AKUSTISCHE ZEITSCHRIFT

Fünftes Heft | Dritter Jahrgang | September 1938

ERICH WAETZMANN

zum Gedächtnis

Am 7. Juli dieses Jahres verschied unerwartet Prof. Dr. phil. ERICH WAETZMANN, ordentlicher Professor an der Technischen Hochschule zu Breslau; er befand sich gerade in Berlin auf der Durchreise nach Bad Wörrishofen, in dem er Heilung von seinem Leiden zu finden hoffte. Nur wenige Monate sind es her, daß er in dieser Zeitschrift in einem Nachruf auf MAX WIEN dessen Verdienste um die Akustik würdigte. Er tat dies damals mit besonderer Liebe, weil er MAX WIEN, dem er freundschaftlich verbunden war, als den Altmeister der Akustik in seiner Generation ansah. Vor einigen Jahrzehnten nach dem Tode von H. v. HELMHOLTZ waren es in der Tat nur wenige, die sich in Deutschland mit der experimentellen Akustik befaßten. Unter ihnen befand sich auch E. WAETZMANN, der schon lange vor der Entwicklung der modernen Elektroakustik die Akustik zu seinem Arbeitsgebiet machte, und der schon damals eine große Reihe von Ergebnissen fand, die sich bei dem späteren technischen Aufschwung des Faches als außerordentlich fruchtbar erwiesen.

E. Waetzmann

WAETZMANN wurde als Pfarrerssohn in Weißensee bei Posen am 2. Januar 1882 geboren. Nach seinem Abiturium studierte er zunächst Theologie und ging dann später zum Studium der Naturwissenschaften und der Mathematik über. Im Oktober 1904 promovierte er zum Dr. phil. an der Universität Breslau, dem gleichen Ort, in dem auch sein weiterer Aufstieg erfolgte. Er wurde Assistent von OTTO LUMMER mit dem ihn in späteren Jahren seines Lebens eine enge und herzliche Freundschaft vereinigte und mit dem er auch in Gemeinschaft mit Prof. EUCKEN den Müller-Pouillet, das Lehrbuch der Physik, neu herausgab. 1907 habilitierte er sich, 1908 trat er für einen kleineren Zeitraum in die Firma Siemens & Halske ein, 1912 wurde er a. o. Professor, 1917 Abteilungsvorsteher am Physikalischen Institut der Universität Breslau, 1920 wurde er zum o. Professor ernannt, 1926 endlich erhielt er das Physikalische Institut der Technischen Hochschule Breslau und wurde zugleich Honorarprofessor an der Universität. Während des Krieges stellte er seine großen physikalischen

Kenntnisse in den Dienst des Vaterlandes, er konstruierte Horchgeräte für die Flugabwehr und Geophone, Apparate zum Abhören von Bodenschall. Er erhielt das E. K. II. Kl.

In späteren Lebensjahren wurde er korrespondierendes Mitglied der mathematisch-physikalischen Klasse der Göttinger Gesellschaft der Wissenschaften sowie korrespondierendes Mitglied der Warschauer Akademie der technischen Wissenschaften. 1933 wurde ihm für seine Verdienste um die Weiterentwicklung des elektrischen Nachrichtenwesens von der Georg-August-Universität zu Göttingen die Gauß-Weber-Denkmünze verliehen.

Das Gebiet, dem WAETZMANN die weitaus meisten Arbeiten gewidmet hat, ist die physiologische Akustik. Anfang dieses Jahrhunderts schwebte die Streitfrage, welcher Hörtheorie der Vorzug zu geben sei, einer Resonanztheorie, wie sie besonders von HELMHOLTZ begründet war, oder anders gearteten Theorien, z. B. der EWALDschen Schallbildertheorie, der Telephontheorie u. dgl. Hier griff WAETZMANN in entscheidender Weise ein und stellte sich voll auf den Boden der ersteren Anschauung. Sein 1912 erschienenes Buch „Die Resonanztheorie des Hörens" legt davon Zeugnis ab. Mit zahlreichen schön ausgedachten Versuchen bestimmte er die Dämpfung der hypothetischen Ohrresonatoren. Wenn auch unsere heutigen Ansichten über den Hörprozeß sich auf Grund der modernen Versuchsmöglichkeiten etwas geändert haben, so gebührt doch WAETZMANN das Verdienst, in neuerer Zeit der Resonanztheorie, oder wie es später einmal GILDEMEISTER genannt hat, der Einortstheorie des Hörens zum Siege verholfen zu haben. Zur Hörtheorie gehört die Entstehung der Kombinationstöne, eine Frage, der WAETZMANN sich ganz besonders zuwandte. Er zeigte, daß die einfache Hinzufügung eines quadratischen Gliedes in der Schwingungsgleichung nicht hinreichend ist, um die Stärke der entstehenden Kombinationstöne zu erklären. Insbesondere ließ sich die Größe des Differenztones 1. Ordnung nur durch die Annahme eines Gleichrichtereffektes im Ohr deuten. Hiermit stellte er sich sehr stark gegen damals bestehende Ansichten über den Ursprung der Kombinationstöne, insbesondere gegen die KÖNIGsche Schwebungstheorie. Sehr bekannt sind in diesem Zusammenhang seine Versuche an unsymmetrisch belasteten Membranen und an Kohlemikrophonen geworden. Die starke „nichtlineare" Verzerrung des Kohlemikrophons, die Entstehung des Differenztones bei zwei einwirkenden Primärtönen, war es besonders, die die Aufmerksamkeit von WAETZMANN auf sich zog. Die Entwicklung der Elektroakustik hat mittlerweile gezeigt, daß bei Schallübertragungsanlagen gerade diese Effekte der ungeradlinigen Verzerrung wichtig sind, und es ist besonders erfreulich, daß das alte WAETZMANNsche Verfahren, die Prüfung mit 2 Primärtönen auszuführen, in erweiterter Form zur allerneuesten Verzerrungsbestimmung allgemein bei elektroakustischen Anlagen benutzt wird.

Die physiologischen Arbeiten der letzten Jahre befaßten sich mit Hörschwellenfragen. Auf diesem Gebiete verdanken wir WAETZMANN zwei wesentliche Ergebnisse. Das erste ist meßtechnischer Art. Seit den Untersuchungen von MAX WIEN waren eine große Reihe von Hörschwellenmessungen ausgeführt worden, deren Ergebnisse sich vielfach widersprachen und bei denen immer etwas verschiedene Definitionen der Hörschwellenintensität zugrunde gelegt waren. Mit einer Reihe von Schülern schuf WAETZMANN in mühsamen vieljährigen Arbeiten die Grundlage für eine saubere meßtechnische Bestimmung der Hörschwelle. Hierzu waren auch Messungen des Trommelfellscheinwiderstandes oder, anders ausgedrückt, Messungen des Schallschluckgrades und des Phasensprunges am Trommelfell erforderlich, die mit teilweise neuen, sehr genau arbeitenden Verfahren ausgeführt wurden. Unter Benutzung dieser Größen lassen sich nun die verschiedenen Definitionen für die Hörschwellenintensität aufeinander beziehen, und es liegen jetzt genaue Meßwerte in bestimmten Frequenzbereichen vor. Bei den hierher gehörigen Versuchsreihen gelang es WAETZMANN auch, einen wichtigen Effekt aus der Erbbiologie zu finden. Bei Untersuchungen an Mitgliedern einer Familie zeigte sich nämlich, daß nicht nur, wie man ja weiß, äußere Ähnlichkeiten des Gehörorgans hinsichtlich Ohrmuschel

u. dgl. vorhanden sind, sondern daß auch die Hörschwellenkurven einen überraschend gleichen Verlauf zeigen, fast so gleich, daß man sie, die sonst von Person zu Person sehr verschieden sind, unmittelbar zur Deckung bringen kann. Das gleiche gilt für die Widerstandskurven, die die Eigenschaften des Trommelfells angeben. Auch bei Schwerhörigen zeigt eine Ähnlichkeit der Kurven erbliche Taubheit an.

Auf dem Gebiete der physikalischen Akustik hat WAETZMANN eine große Reihe von Problemen bearbeitet. Eine Serie von Untersuchungen befaßt sich mit den Eigenschaften des Widerstandsthermometers, auch Thermomikrophon genannt. Es sind dies dünne Wollastondrähte, mit denen recht genau die Temperaturamplituden in stehenden oder fortschreitenden Schallwellen gemessen werden können. Zugleich ist dies ein Verfahren zur Schallintensitätsmessung, wie der Vergleich der von WAETZMANN und FRIESE ausgearbeiteten Theorie mit Messungen nach der WIENschen Membranmanometermethode ergab. Aus der Raumakustik ist besonders bekannt seine Arbeit mit K. SCHUSTER über den Nachhall in geschlossenen Räumen, in der zeitlich etwas früher die in der englischen Literatur unter dem Namen EYRING bekanntgewordene Nachhallformel abgeleitet wird; sie stellt für den Fall stärkerer Raumdämpfung eine wesentliche Verbesserung der einfachen JÄGER-SABINEschen Gleichung dar. Der Nachhall wird in dieser Arbeit im Gegensatz zu den damals verbreiteten geometrisch-akustischen Anschauungen als Folge des Ausklingens der freien Raumeigenschwingungen aufgefaßt. Eine Arbeit der letzten Jahre beschäftigt sich mit akustischen Filtern, die ja für die Geräuschdämpfung bei Explosionsmotoren von großer praktischer Bedeutung sind. Hier wird die von STEWART aufgestellte Theorie in dem Sinne erweitert, daß gewisse Abmessungen der Filter im Zuge der Schalleitung groß zur Wellenlänge sein können. Diese praktisch wichtige Erweiterung hat zur Folge, daß nicht bloß ein Durchlaßbereich bzw. ein Sperrbereich existieren, sondern daß viele derartige Bereiche mit wachsender Frequenz aufeinanderfolgen. Die technische Bemessung der Filter hat sich nach solchen Gesetzmäßigkeiten zu richten. Schließlich müssen wir in dieser Gruppe noch eine Arbeit über den Flugzeugschall nennen, die durch Beobachtungen im Kriege entstanden ist. Sie ist besonders charakteristisch für die Arbeitsweise von WAETZMANN. Mit ganz einfachen Mitteln, durch rein subjektives Abhören, nur unterstützt durch Resonatoren, gelingt es ihm, die wesentlichen Komponenten des Flugzeugschalles, den Drehklang und das ungefähre Abstrahlungsdiagramm in qualitativer Form anzugeben. Seine Hauptergebnisse konnten gerade in jüngster Zeit in Untersuchungen, die sich aller modernen Mittel der Elektroakustik bedienen, bestätigt werden.

Das Bild über die wissenschaftlichen Forschungsarbeiten von WAETZMANN wäre unvollständig, wenn wir nicht noch kurz seine optischen Untersuchungen erwähnen wollten. Hier waren es besonders die Interferenzerscheinungen, die er bearbeitete; gemeinsam mit E. BRATKE entstand dabei ein Verfahren, optische Abbildungsfehler von Linsen festzustellen. Auch gewisse Erscheinungen im Inneren des Auges, die sogenannten entoptischen Ringsysteme interessierten ihn; es sind dies Beugungsringsysteme, die beim Blinzeln gegen eine helle Lichtquelle entstehen und die ihre Ursache in kleinen beugenden Körperchen haben, die in der Ebene der Pupille des beobachtenden Auges liegen. Ein gewisses Analogon hierzu ist eine akustische Arbeit von ihm, die sich mit dem Hören in der Stille, mit im Ohr durch Muskelanspannung entstehenden Frequenzen beschäftigt, von denen es über den ganzen Frequenzbereich verteilt 3 Gruppen gibt.

Die großen allgemeinen physikalischen Kenntnisse und die gute Übersicht über die Akustik im speziellen befähigten WAETZMANN sehr, bei der Herausgabe von Lehr- und Handbüchern mitzuwirken. Erwähnt wurde bereits die Mitarbeit am Müller-Pouillet, dessen akustischen Teil er selbst verfaßte. Besonders verdienstvoll war jedoch seine Herausgebertätigkeit beim Handbuch der technischen Akustik, das sämtliche Disziplinen der modernen Akustik umfaßt.

Neben dem Forscher WAETZMANN haben wir noch seiner Tätigkeit als Hochschullehrer und

seiner sonstigen Vortragstätigkeit zu gedenken. Hier zeigte sich noch eindringlicher eine Eigenschaft, die schon aus den wissenschaftlichen Veröffentlichungen hervorleuchtet. Seine Vorlesungen und Vorträge waren von einer seltenen Klarheit in der Anlage und im Ausdruck. Es widerstrebte ihm aufs äußerste, über etwas vorzutragen, was er nicht bis in die kleinsten Einzelheiten hinein verstanden hatte. Ebensogut wie seine Vorträge waren seine Experimente, die für jede Vorlesung aufs sorgfältigste bis in alle Feinheiten vorbereitet sein mußten. Die Versuche klappten stets mit einer fast einfach erscheinenden Selbstverständlichkeit. Hieran dürften sich nicht bloß seine Hörer erinnern, sondern in noch höherem Maße seine Mitarbeiter, die die Aufgabe hatten, die Vorlesung vorzubereiten. Diejenigen unter ihnen, die in nähere Berührung mit ihm kamen, seine Assistenten und Doktoranden wissen, daß er ihnen bei aller Strenge der Anforderungen menschlich ein sehr guter Freund war, dem auch ihr Fortkommen noch in späteren Jahren am Herzen lag.

Wir können unseren Nachruf auf Erich Waetzmann nicht besser beschließen als mit den Worten, mit denen der Rektor der Technischen Hochschule zu Breslau den Heimgang anzeigte. „Wir verlieren einen der besten von uns, einen hervorragenden Forscher, dessen Ruf weit über die Grenzen unseres Vaterlandes hinausreicht, einen lieben, stets hilfsbereiten Kollegen und einen ausgezeichneten Lehrer. Sein Name bleibt unlösbar mit der Geschichte der Technischen Hochschule Breslau verbunden."

Wir fügen hinzu, sein Name bleibt unlösbar mit der Akustik verbunden.

Erwin Meyer

Zur Schallausbreitung in der Atmosphäre

Von E. Waetzmann, J. Scholz und H. Krüger[1])

(Mit 9 Textabbildungen)

§ 1. Fragestellung

Es liegt nahe, die Gesetze der Schallausbreitung in der freien Atmosphäre für kurze Schallwege am Flugzeugschall zu untersuchen. Dieser Weg ist auch schon beschritten worden[2]). Da der Flugzeugschall in verwickelter Weise aus zahlreichen Einzelkomponenten zusammengesetzt ist[3]), empfiehlt es sich, auch einfachere Schallsignale, etwa Schüsse, die vom Flugzeug aus abgegeben werden, zur Beobachtung heranzuziehen. Wird ein Wetterflugzeug eingesetzt, so hat man gleichzeitig die wichtigsten Daten über den jeweiligen Zustand der Atmosphäre. Es erscheint uns wünschenswert, daß die bisher vorliegenden Ergebnisse nach verschiedenen Richtungen hin nachgeprüft und erweitert werden. Um einen Anstoß hierfür zu geben, möchten wir im folgenden einige Überlegungen und Beobachtungen mitteilen, die schon vor längerer Zeit angestellt worden sind.

§ 2. Bemerkungen zur Theorie

Es muß zunächst die vereinfachende Annahme gemacht werden, daß das Flugzeug eine punktförmige Schallquelle ist, die ihre Energie nach allen Seiten gleichmäßig ausstrahlt, also Kugelwellen aussendet. Für den Schußgeber trifft diese Annahme viel besser zu als für das Flugzeug. Es ist also für ein homogenes Medium anzusetzen:

$$I_r = \frac{I_0}{r^2}, \tag{1}$$

wobei I_0 die auf die Flächeneinheit bezogene Energie in der Entfernung 1 m von der Schallquelle, I_r diejenige in der Entfernung r m bedeutet. Für die Lautstärke L gilt (bei mittleren Tonhöhen):

$$L = 10 \log_{10} \frac{I}{I_s},$$

wobei I_s die Hörschwellenenergie ist. Für die Differenz zweier Lautstärken in den Entfernungen r_1 und r_2 ergibt sich:

$$\begin{aligned} L_1 - L_2 &= 10 \log_{10} \frac{I}{r_1^2 I_s} - 10 \log_{10} \frac{I}{r_2^2 I_s} \\ &= 10 \log \frac{r_2^2}{r_1^2} = 20 \log \frac{r_2}{r_1}. \end{aligned} \tag{2}$$

Kennt man also die Lautstärke in irgendeiner Entfernung, so ist ihr Verlauf längs des gesamten Schallweges berechenbar.

Abweichungen von dem quadratischen Gesetz können durch Inhomogenitäten in dem fortleitenden Medium, zu denen vor allem auch Windeinflüsse zu rechnen sind, durch Begrenzung des Schallfeldes (Erdoberfläche), die die kugelförmige Ausbreitung stört, und durch Absorption hervorgerufen werden. Man kann dann, wie es bereits geschehen ist, die experimentellen Ergebnisse rechnerisch in der Weise darzustellen suchen, daß in Formel (1) eine andere Entfernungspotenz als die zweite eingesetzt wird. Für den Fall der Dämpfung ist es aber physikalisch sinnvoller, das quadratische Gesetz anzusetzen und ein Dämpfungsglied einzufügen:

$$I_r = \frac{I_0}{r^2} \cdot e^{-\delta \cdot r}. \tag{3}$$

Da sich die Dämpfung auf sehr kurze Entfernungen kaum bemerkbar macht, darf auch hier I_0 als die Intensität in der Entfernung 1 m von der Quelle angesehen werden. δ ist das Reziproke derjenigen Strecke, auf der die abgestrahlte Gesamtintensität auf den e-ten Teil abgesunken ist.

---

[1]) Die vorliegende Arbeit fand sich im Nachlaß von Prof. Dr. E. Waetzmann ausgearbeitet vor und wurde uns von Herrn Dr. Schuster zum Abdruck zur Verfügung gestellt. Die Schriftleitung.

[2]) E. R. House, J. Acous. Soc. Am. 7 (1935/36), S. 127.

[3]) Zur Einführung in das Schrifttum seien genannt: E. Waetzmann, Z. techn. Physik 2 (1921), S. 166; L. Prandtl, Z. techn. Physik 2 (1921), S. 244.

Für $L_1 - L_2$ ergibt sich dann:

$$(4) \qquad L_1 - L_2 = 20 \log \frac{r_2}{r_1} + 4{,}3\,\delta\,(r_2 - r_1).$$

Die Größe der Abweichung vom quadratischen Gesetz für verschiedene δ-Werte zeigt Abb. 1. Die ausgezogene Kurve stellt das quadratische Gesetz dar, die gestrichelten Kurven sind unter Zugrundelegung der δ-Werte 2, 4, 6, 8 und $10 \cdot 10^{-4}$ [m^{-1}] berechnet. Es ist nun zu prüfen, ob in atmosphärischer Luft Dämpfungskonstanten von der angenommenen Größenordnung auftreten können.

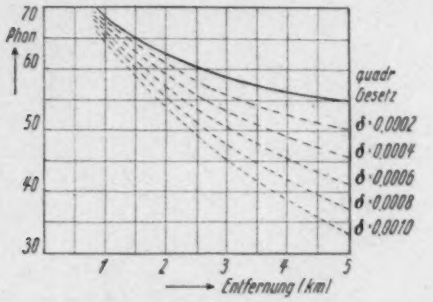


Abb. 1. Abweichung vom quadratischen Gesetz der Schallausbreitung für verschiedene Werte der Dämpfungskonstante δ

Bis vor wenigen Jahren nahm man an, daß die Absorption in der freien Luft vernachlässigt werden dürfe, weil die von RAYLEIGH, KIRCHHOFF und STOKES aufgestellte Theorie der Schallabsorption in Gasen sehr kleine Dämpfungskonstanten ergab. KNUDSEN[4]) stieß aber bei raumakustischen Messungen auf Dämpfungswerte, die um mehrere Zehnerpotenzen größer waren als die nach der klassischen Theorie berechneten. Außerdem ergab sich eine Frequenzabhängigkeit, die durch die klassische Theorie nicht erklärt werden konnte. KNESER[5]) hat die Frage nicht nur in experimenteller Hinsicht weiter verfolgt, sondern hat auf Grund quantentheoretischer Betrachtungen auch eine Theorie dieser molekularen Schallabsorption aufgestellt. Nach den KNESERschen Vorstellungen wird die Absorption durch die Trägheit der Moleküle beim Austausch der verschiedenen Energieformen — Schwingungsenergie gegen Rotationsenergie und translatorische Energie — bei adiabatischen Kompressionen verursacht. Für die Konstante δ der molekularen Absorption findet er:

$$(5) \qquad \delta = \frac{R\,C_s}{C_v(C_v + \Re)\,c} \cdot \frac{k\,\omega^2}{k^2 + \omega^2}\ [m^{-1}].$$

Hierbei bedeuten R die Gaskonstante, C_s die Schwingungswärme, C_v die Molwärme bei konstantem Volumen (abzüglich Schwingungswärme), c die Schallgeschwindigkeit, k das Reziproke der Einstelldauer τ der Schwingungsenergie und ω die Kreisfrequenz der Schallwelle. C_s ist eine Funktion der absoluten Temperatur und kann aus quantentheoretischen Beziehungen berechnet werden. k verändert sich mit der Temperatur nur wenig; dem Druck des Gases ist es proportional, durch Beimengung gewisser Fremdgase wird sein Wert stark erhöht. Auch Zusatz von Wasserdampf bewirkt eine Erhöhung von k. Für wasserdampfhaltige Luft gab KNESER 1933 auf Grund einiger Versuche von KNUDSEN die Beziehung an:

$$(6) \qquad k = 3{,}56 \cdot 10^9\,h^2,$$

wobei h das Verhältnis der Zahl der Wasserdampfmoleküle zu der Zahl der Luftmoleküle in einem bestimmten Volumen bedeutet. Diese ungewohnte Darstellung der Feuchte wird benutzt, weil es sich hier um die Betrachtung molekularer Vorgänge handelt.

Da die Molekularabsorption des Sauerstoffs viel stärker ist als die des Stickstoffs, ist die molekulare Absorption der Luft praktisch nur durch ihren Sauerstoffgehalt bedingt. Für den Bereich von 500—11000 Hz stellte KNUDSEN bei 20° C und einem Druck von ~ 760 mm Hg experimentell fest: Trockene Luft hat geringe Absorption. Bei Hinzutritt von Wasserdampf wird die Absorption größer, erreicht bei einer gewissen Konzentration ein Maximum, um dann wieder abzufallen. Als Beispiel ist in Abb. 2 der Absorptionsverlauf für 1500 und 3000 Hz aufgetragen (ausgezogene Kurven). Die Auswertung der KNESERschen Formel (5) für die gleichen Frequenzen liefert die gestrichelten Kurven.

[4]) V. O. KNUDSEN, J. Acous. Soc. Am. 3 (1931), S. 126; 5 (1933), S. 112.

[5]) H. O. KNESER, Ann. Physik V, 16 (1933), S. 337; J. Acous. Soc. Am. 5 (1933), S. 122; H. O. KNESER und V. O. KNUDSEN, Ann. Physik V, 21 (1934), S. 682; Z. techn. Physik 16 (1935), S. 213.

Weiter hat KNUDSEN festgestellt, daß der Betrag der maximalen Absorption δ_{max} bei konstanter Temperatur der Frequenz proportional ist; bei konstant gehaltener Frequenz nimmt er mit steigender Temperatur zu. Die Wasserdampfkonzentration, bei der δ_{max} auftritt, steigt bei Konstanthaltung von Temperatur und Druck proportional mit der Wurzel aus der Frequenz.

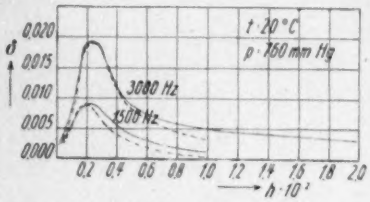


Abb. 2. Abhängigkeit der Molekularabsorption vom Wasserdampfgehalt der Luft

Um einen Überblick über die Größenordnung der bei Flugzeugschall auftretenden Absorptionskonstanten zu geben, sind in der folgenden Zahlentafel δ_{max}-Werte für den Frequenzbereich von 200—1500 Hz und den für unsere Beobachtungen besonders wichtigen Temperaturbereich von + 20 bis — 20° C angegeben. Daneben sind die zugehörigen Feuchten eingetragen, die zur besseren Anschaulichkeit auf relative Feuchten (RF) umgerechnet wurden. Da KNUDSEN seine bei — 15 und + 2° C ausgeführten Messungen als unsicher bezeichnet, stehen in dem genannten Temperaturbereich nur Meßergebnisse für + 20° C (Bereich 500 bis 1500 Hz) zur Verfügung, die mit den nach KNESER berechneten Werten gut übereinstimmen. Alle übrigen Werte sind errechnet. Man darf aber nach dem oben Gesagten annehmen, daß auch die errechneten Werte einen brauchbaren Hinweis auf die in der freien Luft vorkommenden Werte geben.

Die Werte für die relative Feuchte gelten sämtlich für Normaldruck. Der Umrechnungsfaktor für andere Drucke ist $\frac{1}{\sqrt{p}}$, wobei p das Verhältnis von Normaldruck zu vorhandenem Druck ist. In den durch Strichen gekennzeichneten Fällen tritt Sättigung ein, ehe δ_{max} erreicht wird.

Es sei nochmals betont, daß den Feuchtigkeitswerten der Zahlentafel die 1933 aufgestellte KNESERsche Formel (6) zugrunde liegt. 1935 gab KNESER einen anderen Zusammenhang zwischen k und h an, wobei er sich auf die Annahme stützte, daß die Feuchtigkeitsabhängigkeit von k in Luft die gleiche ist wie in Sauerstoff. Für Sauerstoff liegen — allerdings vorwiegend für Frequenzen oberhalb 1500 Hz — genaue Messungen von KNUDSEN, KNESER und OBERST vor. Legt man diese Messungen auch für Luft zugrunde, so ändern sich die in der Zahlentafel angegebenen Feuchtigkeitswerte teilweise recht erheblich. Da es zur Zeit noch nicht möglich scheint, eine Entscheidung zwischen den von KNESER diskutierten Möglichkeiten zu fällen und etwas Endgültiges auszusagen, soll die Frage nicht näher erörtert werden.

Versuche über die Dämpfung von Schallwellen während ihrer Fortpflanzung längs einer absorbierenden Schicht sind vor einigen Jahren von v. BÉKÉSY[6]) angestellt worden. Dieser Dämpfungseffekt kann recht stark werden, macht sich aber beim Abhören und Messen von Flugzeugschall nur dann bemerkbar, wenn der Höhenwinkel klein ist.

Ferner muß die Möglichkeit der Hebung des akustischen Horizontes durch die Krümmung der Schallstrahlen beachtet werden.

[6]) G. v. BÉKÉSY, Z. techn. Physik 14 (1933), S. 6.

Temp.	200 Hz		300 Hz		600 Hz		900 Hz		1200 Hz		1500 Hz	
	$\delta_{max}\,10^4$	RF%	$\delta_{max}\,10^4$	RF%	$\delta_{max}\,10^4$	RF%	$\delta_{max}\,10^4$	RF%	$\delta_{max}\,10^4$	RF%	$\delta_{max}\,10^4$	RF%
+20°	13	~ 2	19	3	38	5	57	6	76	7	95	8
+10°	11	~ 4	16	7	32	9	48	11	64	12	80	14
0°	9	~ 8	13	12	26	17	39	20	52	24	65	27
—10°	7	~ 16	10	27	21	37	31	46	41	54	52	60
—20°	5	~ 35	8	66	16	91	24	—	32	—	41	—

Sehr stark kann endlich die Schallausbreitung durch Windböen und turbulente Luftströmungen beeinflußt werden. Es fehlen aber vorläufig die Grundlagen, um diese Vorgänge theoretisch auch nur annähernd zu erfassen.

§ 3. Beobachtungen

Das Flugzeug[7]) flog in konstanter Höhe von weither über die Beobachtungsstelle (*B*-Stelle) und dann darüber hinaus, bis es nicht mehr hörbar war. Sodann stieg es in eine andere Höhe und führte den entsprechenden Flug aus. In Zeitintervallen von 10—20 Sekunden wurde die Lautstärke des Flugzeugschalles in Abhängigkeit von der Zeit gemessen, wobei als Nullzeit der Augenblick festgelegt wurde, in dem die Lautstärke am größten war, das Flugzeug sich also ungefähr senkrecht über der *B*-Stelle befand. Man erhält dann Kurven, wie sie schon von House aufgenommen worden sind. Zur Lautstärkemessung wurde ein Schallmeßgerät von Siemens & Halske benutzt. In Abb. 3a ist ein Beispiel gegeben. Bei klarer Sicht wurde auch die jeweilige Entfernung des Flugzeugs von der *B*-Stelle (sowie der Höhenwinkel) gemessen. Man erhält dann aus den Kurven der Abb. 3a die der Abb. 3b. Konstanter Parameter für die einzelnen Kurven ist wieder die Flughöhe *H*. In der Darstellung 3b brechen die Kurven natürlich an den Stellen ab, an denen die Entfernung gleich der Flughöhe ist. Es sei besonders darauf hingewiesen, daß bei gleicher Entfernung mit abnehmendem Höhenwinkel die Lautstärke vielfach abnimmt.

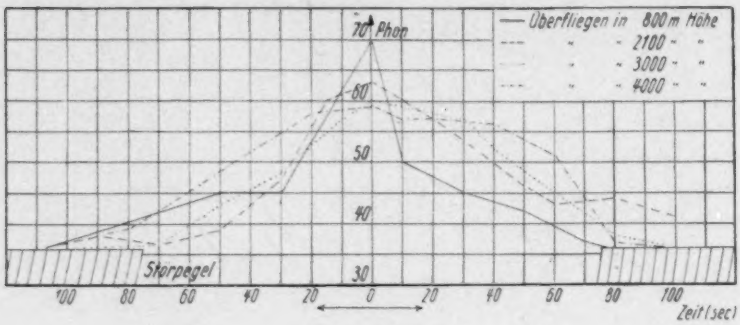


Abb. 3a

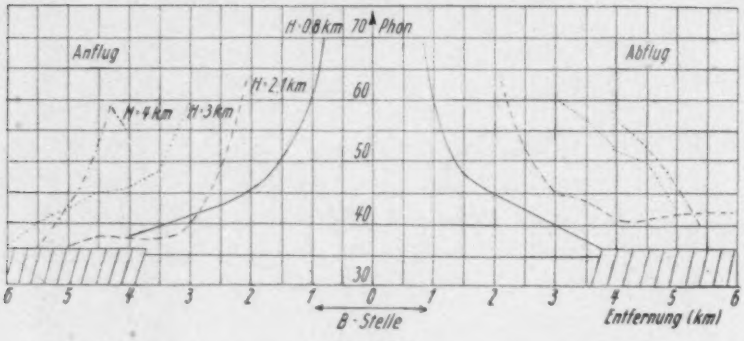


Abb. 3b

Abb. 3. Lautstärke beim Überfliegen der *B*-Stelle:
a) zeitlicher Verlauf,
b) in Abhängigkeit von der Entfernung

Mit besonderer Aufmerksamkeit wurde die Lautstärke gemessen, wenn sich das Flugzeug in bekannter Höhe senkrecht über der *B*-Stelle befand. Zunächst wurden Messungen für Höhen von 250, 500, 750, 1000, 1500 und 2000 m ausgeführt. In den Abb. 4a und 4b sind zwei Beispiele gegeben. Die ausgezogenen Kurven geben die experimentell gefundenen Werte, während die gestrichelten Kurven den theoretischen Verlauf unter der Annahme der Gültigkeit des quadratischen Gesetzes darstellen. Der Bezugs-

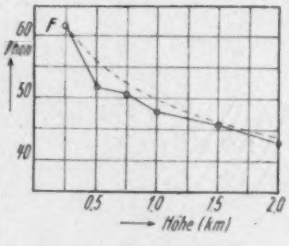


Abb. 4a

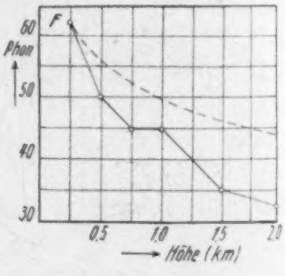


Abb. 4b

Abb. 4. Lautstärke senkrecht über der *B*-Stelle bei verschiedenen Flughöhen:
a) Luftfeuchte und Temperatur normal, b) starker Föhn

[7]) Die Versuchsflüge führte der Wetterflieger Herr Pohl, Breslau, aus, dem für seine Einsatzbereitschaft und für seine Ratschläge besonders gedankt sei.

punkt, in dem der theoretische Wert dem experimentell bestimmten gleichgesetzt wird, ist mit F bezeichnet. Die experimentelle Kurve in Abb. 4a folgt dem quadratischen Gesetz ziemlich gut. Luftfeuchte und Temperatur waren normal. Dagegen nimmt bei der in Abb. 4b dargestellten Beobachtungsreihe die Intensität viel stärker ab, als es dem quadratischen Gesetz entspricht. Es ist wohl anzunehmen, daß hierfür in erster Linie der an diesem Versuchstage herrschende Föhn verantwortlich war. In Abb. 5 ist ein Beispiel für den Lautstärkeverlauf

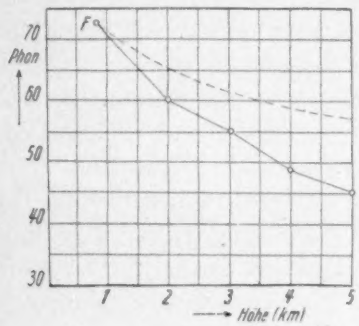


Abb. 5. Lautstärke senkrecht über der B-Stelle bei verschiedenen Flughöhen

bei Höhenunterschieden von 800—5000 m gegeben. Hier nahm die Lautstärke viel stärker ab, als dem quadratischen Gesetz entspricht. In 3500 m Höhe betrug die Temperatur etwa -5^0 C und die relative Luftfeuchte etwa 36%. Hierfür ergibt sich aus der Theorie der Molekularabsorption nach den bisherigen Kenntnissen bei 300 Hz eine Absorptionskonstante von etwa 0,0003. Die in 4500 m Höhe gemessene Temperatur von etwa -12^0 C und relative Feuchte von etwa 34% lassen für 300 Hz auf eine Absorptionskonstante von ungefähr 0,0005 schließen. Die diesem Dämpfungswert entsprechende theoretische Kurve stimmt mit der experimentellen ungefähr überein.

Über der B-Stelle wurden vom Flugzeug aus auch Schüsse abgegeben. Hierbei wurde der Motor für etwa 3—5 Sekunden gedrosselt, so daß die Schußlautstärken ohne Störungen durch den Flugzeugschall am Schallmesser abgelesen werden konnten. Gleichzeitig mit dem Schuß wurde ein Blink- oder Funkzeichen gegeben, so daß aus der Laufzeit des Schalles die Entfernung kontrolliert werden konnte. In den Abb. 6a und 6b sind wieder Beispiele gegeben. Die experimentelle Kurve in Abb. 6a folgt wieder in ziemlich befriedigender Weise dem quadratischen Gesetz. Die Wetterlage bot keine Be-

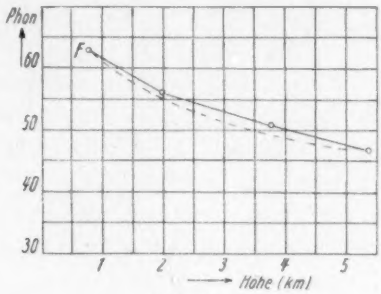


Abb. 6a

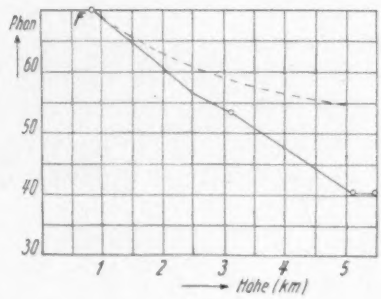


Abb 6b

Abb. 6. Schußlautstärken senkrecht über der B-Stelle bei verschiedenen Flughöhen:
a) Wetterlage normal,
b) anomale Feuchtigkeitsverhältnisse

sonderheiten. Die in Abb. 6b wiedergegebene experimentelle Kurve weicht stark vom quadratischen Gesetz ab. Die Luft am Boden war ruhig, die relative Feuchte nahm aber in der Höhe von etwa 1800 m fast sprungartig von etwa 60% auf weniger als 30% ab. Aus dem Verlauf der experimentellen Kurve wäre auf einen mittleren Dämpfungsfaktor von rund 0,0006 zu schließen.

Für die Bereitstellung von Mitteln und Geräten zur Durchführung der Arbeit haben wir der Deutschen Versuchsanstalt für Luftfahrt und der Siemens & Halske AG. zu danken.

Breslau, Physikalisches Institut der Technischen Hochschule, den 23. Mai 1938.

(Eingegangen am 12. August 1938.)

Der heutige Stand der Schallaufnahmetechnik und ihre Anwendung beim deutschen Rundfunk

Von Hans-Joachim v. Braunmühl

(Mit 13 Textabbildungen)

Bei der Schallaufzeichnung handelt es sich darum, ein einmaliges flüchtiges Schallereignis zu anderer Zeit am anderen Orte so wiedererstehen zu lassen, daß es in seinen akustischen Bestimmungsstücken dem Originalvorgang möglichst vollständig entspricht. In ihrer Möglichkeit, die Zeit zu überwinden, ist die Schallaufzeichnung eine natürliche Ergänzung des Rundfunks. Dieser ist von sich aus nur befähigt zur Überwindung des Raumes und benötigt zwangsläufig die Unterstützung der Schallaufzeichnung zur Überwindung der Zeit. So ist es also kein Zufall, daß sich der Rundfunk sehr bald des Mittels der Schallaufzeichnung bemächtigt und bei der Vielseitigkeit seiner Aufgaben gleich eine ganze Anzahl von Schallaufzeichnungsmethoden in seinem Betriebe benutzt hat.

Es existiert nämlich bis heute kein Schallaufzeichnungsverfahren mit wirklich idealen Eigenschaften, die zu seiner ausschließlichen Verwendung für alle Aufgabengebiete berechtigen. Vielmehr hat es sich gezeigt, daß jedes Verfahren besondere Vorteile besitzt, die seine Benutzung für bestimmte Anwendungsgebiete herausfordern, bei denen die dem betreffenden Verfahren eigenen Nachteile in Kauf genommen werden können.

Es haben sich im Laufe der Zeit die folgenden Verfahren durchsetzen können:

Wachsplatte

Wenn man vom eigentlichen Edisonschen Phonographen absieht, ist die Schallaufzeichnung auf Platten eines der ältesten Verfahren. Sie wurde ursprünglich mit rein akustischen Aufzeichnungs- und Wiedergabegeräten durchgeführt, inzwischen ist man für die Aufnahme allgemein, für die Wiedergabe zum Teil auf elektroakustische Verfahren übergegangen. Für den Rundfunk ist die vollelektrische Ausbildung selbstverständlich. Als Schallträger dient für die Plattenaufnahme eine dicke Wachsplatte geeigneter Konsistenz. Die Aufzeichnung erfolgt mit Hilfe eines elektromagnetischen Schreibers. Der an seinem Anker befestigte Saphirstichel schneidet auf der Aufnahmemaschine eine spiralige Rille in die Wachsoberfläche. Im Rundfunk wird aus betrieblichen Gründen eine Schnittrichtung von innen nach außen benutzt, d. h. die Anfangsrille liegt auf dem kleinsten, das Ende auf dem größten Radius der bespielten Plattenzone. Bei den üblichen Industrieplatten ist ebenfalls aus bestimmten anders gelagerten Gründen die Schnittrichtung umgekehrt. Die Aufzeichnung selbst erfolgt durch Benutzung der bekannten Mikrophone und Verstärker in der sog. Berliner Schrift, d. h. der Saphirstichel führt unter dem Einfluß der akustischen Modulation Oszillationen in Richtung des Plattenradius aus. Die Schnittiefe der Schallrille bleibt dabei konstant. Im Gegensatz hierzu wurde bei dem alten Phonographen die sog. Edison-Schrift angewendet, bei welcher der Schneidestichel senkrecht auf der Oberfläche oszillierte und Vertiefungen der Schallrille ohne seitliche Auslenkungen bewirkte. Es ist interessant, daß dieses Verfahren neuerdings von amerikanischer Seite in der sog. „hill-and-dale-" Schrift wieder aufgegriffen wurde. Gleichzeitig wurden allerdings im gesamten Aufnahme- und Verarbeitungsprozeß wesentliche Verbesserungen vorgenommen, so daß diesen Platten mit Recht eine beträchtliche Vollkommenheit nachgerühmt wird.

Die Wiedergabe der so aufgenommenen Wachsplatte erfolgt mit einem Spezialtonabnehmer. An diesen werden sehr strenge Anforderungen hinsichtlich geringer Maße des zu bewegenden Schwingsystems und dessen Rückstellkraft gestellt, damit die von den Rillenwänden der weichen Wachsplatte aufzubringenden Kräfte zur Bewegung des Schwingsystems so klein wie möglich bleiben. Die physikalischen Eigenschaften der Wachswiedergabe sind in Abb. 1 dargestellt. Die obere Kurve zeigt die Abhängigkeit des Übertragungsmaßes von der Frequenz. Man sieht, daß Frequenzen von 50 bis über 5000 Hz praktisch gleichförmig wiedergegeben werden. Die Angabe der Frequenzkurve allein hat aber keinen großen Wert; denn es ist dem Elektroakustiker geläufig, Frequenzkurven mit elektrischen Entzerrungsmitteln nach Wunsch zu verändern. Man könnte also die Wiedergabe natürlich bis zu Frequenzen von 8000 oder 10000 Hz ausweiten. Entzerrungen beruhen aber im allgemeinen nicht auf einer Anhebung des zu kleinen Niveaus auf den gewünschten Wert, sondern in einer Schwächung der im Verhältnis zu ihnen zu stark wiedergegebenen Frequenzbereiche unter gleichzeitiger Heraufsetzung der Gesamtverstärkung. Durch derartige Maßnahmen wird aber das Störgeräusch stark angehoben und zwar leicht auf einen solchen Wert, der die Güte des Verfahrens erheblich beeinträchtigt. Ein großer Teil aller Bemühungen zur Verbesserung von Schallaufzeichnungsverfahren richtet sich ja auf die wirksame Herabsetzung des Störgeräusches. Die Angabe einer Frequenzkurve muß daher immer vervollständigt werden durch die Angabe des Störgeräusches, entweder in seinem absoluten Wert- oder — noch besser — in seinem Verhältnis zur Nutzlautstärke. Den Kurvendarstellungen dieser Arbeit liegt ein subjektiv optimales Kompromiß zwischen Frequenzumfang und Störgeräuschfreiheit zugrunde. Es könnte freilich meistens die eine Eigenschaft auf Kosten der anderen verbessert werden. Die untere Kurve der Abb. 1 stellt die spektrale Zusammensetzung des Störgeräusches bei der Wiedergabe dar, und zwar bezieht sich die eine Kurve auf die sog. Fremdspannung, d. h. die objektiv vorhandenen Störgeräuschkomponenten pro konstantes Frequenzintervall. Die zweite Kurve zeigt den Verlauf der sog. Geräuschspannung, welche unter Zwischenschaltung eines Ohrkurvenfilters gemessen wurde und dem subjektiven Charakter des Störgeräusches entspricht. Der senkrechte Strich an der linken Seite stellt das Verhältnis zwischen Nutzlautstärke und subjektiver Störlautstärke dar, wobei die Angabe in dezibel erfolgt. 49 db bedeutet, daß das subjektive Störgeräusch etwa um den Faktor 250 kleiner ist als die maximale Nutzlautstärke. Streng genommen erfordert auch letztere eine noch eindeutigere Festlegung. Sie ist durch denjenigen Aussteuerungsgrad des Aufnahmeorgans oder Schallträgers charakterisiert, bei dem die nichtlinearen Verzerrungen einen Wert von etwa 5% nicht überschreiten. Für manche Zwecke

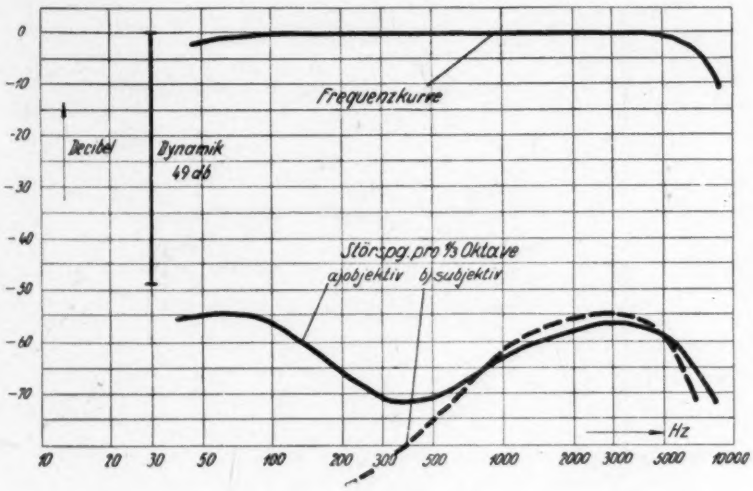


Abb. 1. Wachsverfahren

Aufnahmematerial: Spezialwachs; Stichel: Saphir; Schnittwinkel: 85°; Plattentellerumdrehungen: 78 Umdr./min; Rillenzahl: 40 pro cm; Max. Geschwindigkeitsamplitude: 12,5 cm/sec; Tonabnehmer: Spezialkonstruktion; Spieldauer: $4^1/_2$ Minuten

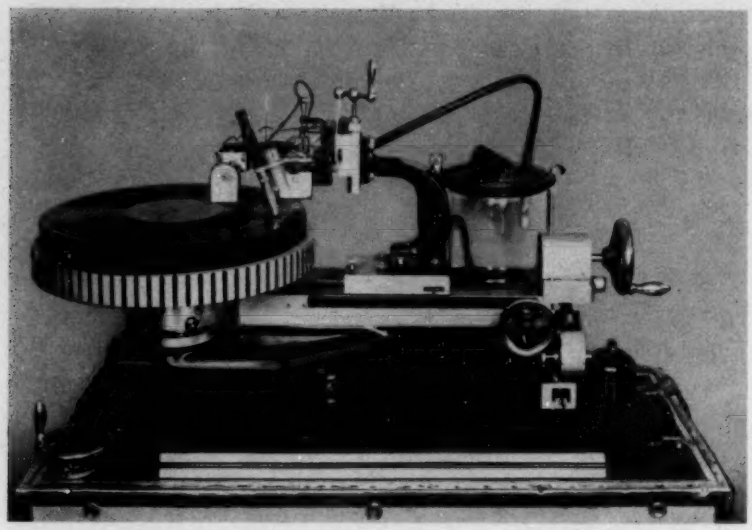


Abb. 2. Wachsaufnahmemaschine

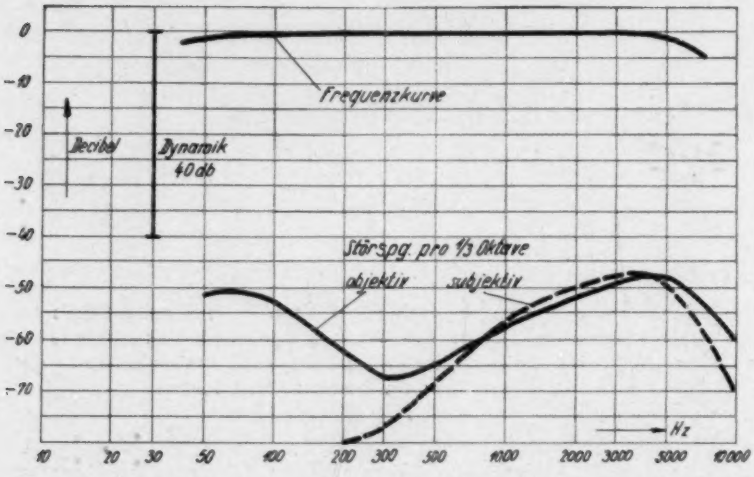


Abb. 3. Schwarzplattenwiedergabe

Plattenmaterial: Thermoplastische Schellackmischung; Plattentellerumdrehungen: 78 Umdr./min; Rillenzahl: 40 pro cm; Max. Geschwindigkeitsamplitude: 12,5 cm/sec; Tonabnehmer: Elektrodynamisch mit Stahlnadel; Spieldauer einer Platte: ca. 5 Minuten

läßt sich vielleicht ein höherer Klirrfaktor in Kauf nehmen, der eine Erhöhung der Aussteuerung und damit eine Heraufsetzung der maximalen Lautstärke zuläßt. Da es sich in diesem Zusammenhange aber vorwiegend um hochwertige Aufzeichnungsverfahren handelt, ist den Darstellungen ein Klirrfaktor von 5% zugrunde gelegt, der auch den Vergleich der Aufzeichnungsverfahren untereinander erleichtert.

Die Wachsaufnahme ergibt, wie sich aus der Kurve ablesen läßt, eine sehr hochwertige störgeräuschfreie und unverzerrte Wiedergabe. Freilich läßt das weiche Wachs nur eine begrenzte Zahl von Wiedergaben zu, da die Rillen doch bei jedesmaligem Abspielen beschädigt werden. Für sehr viele Zwecke im Rundfunk kommt es jedoch gerade darauf an, bestimmte Darbietungen zwei- oder dreimal zu wiederholen, ohne daß an der dauernden Erhaltung der Aufzeichnung ein Interesse besteht. Die benutzte Aufnahmemaschine ist in der Abb. 2 dargestellt.

Schwarzplatten

Wenn es sich darum handelt, eine Wachsaufnahme sehr oft wiederzugeben, oder wenn das aufgenommene Ereignis im Archiv erhalten werden soll, werden von der Wachsplatte auf dem Umwege einer galvanisch hergestellten Matrize Schwarzplatten hergestellt. Abb. 3 zeigt die physikalischen Eigenschaften der so gewonnenen Schwarzplatte. Der Verlauf der Kurve ist naturgemäß dem des Wachses sehr ähnlich; nur das Störgeräusch ist wegen der größeren Körnigkeit des Schwarzplattenmaterials größer. Der dynamische Bereich, das ist das Verhältnis der vorhin definierten Nutzlautstärke zu der subjektiven Störlautstärke, beträgt nur 40 db oder im linearen Maß 1:100.

Schwarzplatten werden von allen Aufnahmen mit Dauerwert hergestellt und in einem Archiv zusammen mit den dazugehörigen Matrizen verwahrt.

Schallfolien

Eine Abart der Wachsplatten — oder richtiger gesagt, ein Mittelding zwischen Wachsplatte und Schwarzplatte — stellen die Schallfolien dar, die man auch als Direkt-Platten bezeichnet hat. Es sind dies dünne Scheiben aus Gelatine oder Kunstharz oder metallischem Träger mit einem schneidbaren Überzug, die einerseits weich genug sind, um von einem Aufzeichnungsgerät beschriftet zu werden, andererseits aber auch widerstandsfähig genug, um eine große Zahl von Abspielungen auf normalen Geräten zu vertragen. Die Aufzeichnung erfolgt grundsätzlich mit ähnlichen Mitteln wie bei den Wachsplatten, nur muß der elektromagnetische Schreiber der Härte des Aufnahmematerials angepaßt sein. Man verwendet zum Schnitt auch keine Saphirstichel, da diese infolge der Härte und durch die unvermeidlichen Unreinigkeiten der Folien zu leicht beschädigt werden würden, sondern zähe Stahlstichel. Abb. 4 zeigt die für die Schallaufnahme maßgebenden Kurven. Man sieht, daß die Frequenzkurve nicht ganz so hoch hinaufgeht wie bei den Wachsplatten. Die Ursache hierfür liegt vor allem im Schreiber begründet. Das Störgeräusch liegt etwa zwischen dem der Wachsplatte und der Schwarzplatte. Man erhält ein dynamisches Verhältnis von 44 db.

Die im Rundfunk verwendete Aufnahmeapparatur ist in Abb. 5 dargestellt. Wie die Kofferform zeigt, sind die Geräte verhältnismäßig robust gebaut und transportabel ausgeführt. Sie sind vor allen Dingen in sog. Übertragungswagen eingebaut, die im Lande umherfahren, die wichtigen Ereignisse einfangen und die Schallfolien aufnehmen. Eine gedrängte Zusammenfassung der eingefangenen Geschehnisse wird mehrmals am Tage in den sog. Echosendungen ausgestrahlt. Einen besonders inten-

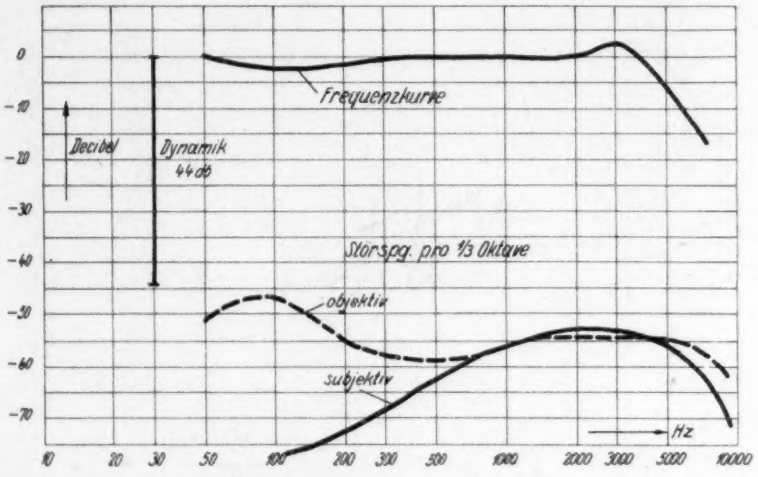


Abb. 4. Schallfolienverfahren

Plattenmaterial: Decelith (Kunstharz); Schneidstichel: Stahl; Schneidwinkel: 85°; Plattentellerdrehzahl: 78 Umdr./min.; Rillendichte: 35 Rillen pro cm; Max. Geschwindigkeitsamplitude: 12,5 cm/sec; Tonabnehmer: Elektrodynamisch mit Saphirnadel; Spieldauer einer Platte: 4 Minuten

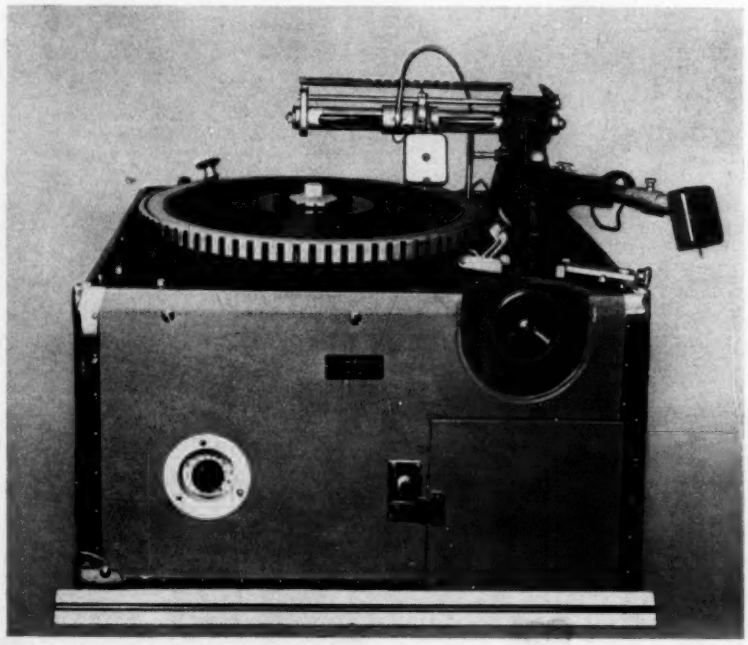


Abb. 5. Schallfolienaufnahmemaschine

siven Einsatz haben solche Schallfoliengeräte bei den Olympischen Spielen 1936 erfahren, wo im ganzen 11200 Schallfolien für den in- und ausländischen Bedarf hergestellt wurden.

Stahlband

Wenn es auch möglich ist, die begrenzte Spieldauer von Schallplatten durch einwandfrei funktionierende Überlappungsverfahren zu überbrücken, so war es doch prinzipiell erwünscht, Schallträger mit längerer Aufnahmedauer zu besitzen.. Es ist zwar möglich, sog. Langspielplatten herzustellen, die bei entsprechend vergrößertem Durchmesser eine Spieldauer von etwa einer halben Stunde haben, jedoch bereitet die betriebssichere Aufnahme und Wiedergabe solcher Platten noch erhebliche Schwierigkeiten. Es lag daher nahe, bandförmige Träger zu versuchen, bei denen gleichzeitig noch der Vorteil erhofft werden konnte, daß man die aufgenommenen Darbietungen durch Herausnahme bestimmter Bandteile oder Einfügung anderer nach Art des filmischen Schnitts umarbeiten kann. Außerdem war mindestens von einem Teil der Bandverfahren zu erwarten, daß sie gegen Erschütterungen unempfindlich sind und so Aufnahmen aus bewegten Fahrzeugen gestatten, eine Aufgabe, die gelegentlich zu lösen ist und mit Schallplatten nicht bewältigt werden kann. Auf dem magnetischen Prinzip ist hier zunächst die Stahlbandmaschine zu nennen, eine Weiterentwicklung des Telegraphons von Petersen und Poulsen, die als Träger noch Stahldraht benutzten. Das Prinzip der magnetischen Schallaufzeichnung ist in Abb. 6 dargestellt. Ein Stahlband läuft mit konstanter Geschwindigkeit an einer Anzahl von magnetisierenden Vorrichtungen vorbei. In der ersten, die als Löschkopf bezeichnet wird, werden durch einen starken magnetischen Gleichfluß alle etwa früher auf dem Bande vorhandenen Aufzeichnungen gelöscht. Gleichzeitig verläßt das Band diesen Kopf mit einer seiner

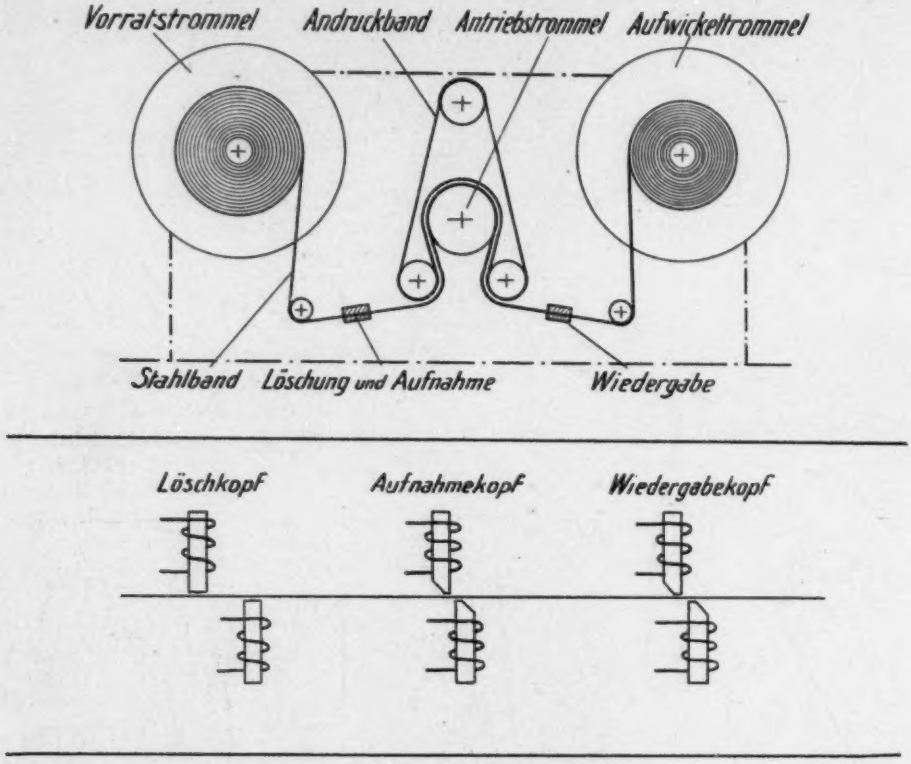


Abb. 6. Schematische Darstellung des Stahlbandverfahrens

Remanenz entsprechenden konstanten Magnetisierung. Es tritt nun in den sog. Sprechkopf ein. Dieser übt unter dem Einfluß einer Gleichstromwicklung des Kopfes zuerst eine Verschiebung der Ruhemagnetisierung des Bandes auf einen günstigen Arbeitspunkt der Magnetisierungskurve aus. Gleichzeitig drückt er dem Band durch eine Sprechwicklung Wechselmagnetisierungen im Rhythmus der akustischen Modulation auf. Diese von Ort zu Ort schwankende Magnetisierung kann nun an einem Wiedergabekopf in elektrische Ströme zurückverwandelt werden. Mit Rücksicht auf die magnetische Sättigungsgrenze des Bandes und das physikalische Prinzip der Abtastung müssen bei Aufnahme und Wiedergabe bestimmte Frequenzentzerrungen durchgeführt werden. Die kurvenmäßige Darstellung der Über-alles-Eigenschaften zeigt Abb. 7. Die Frequenzkurve ist nicht ganz so gut wie bei den bisher besprochenen Verfahren. Auch ist das Störgeräusch etwas höher, so daß eine Gesamtdynamik von 38 db erreicht wird. Abb. 8 zeigt die äußere Ausführungsform.

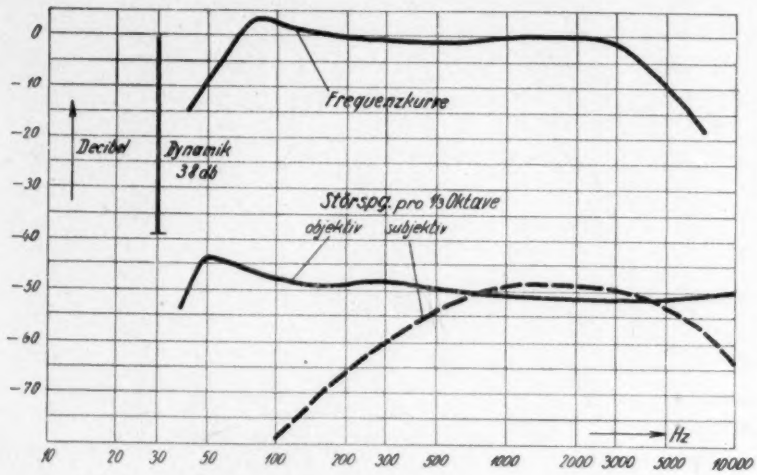


Abb. 7. Stahlbandverfahren
Schallträger: Stahlband; Bandbreite: 3 mm; Banddicke: 0,08 mm; Bandgeschwindigkeit: 1,5 m/sec; Wiedergabedauer einer Spule: 30 Minuten

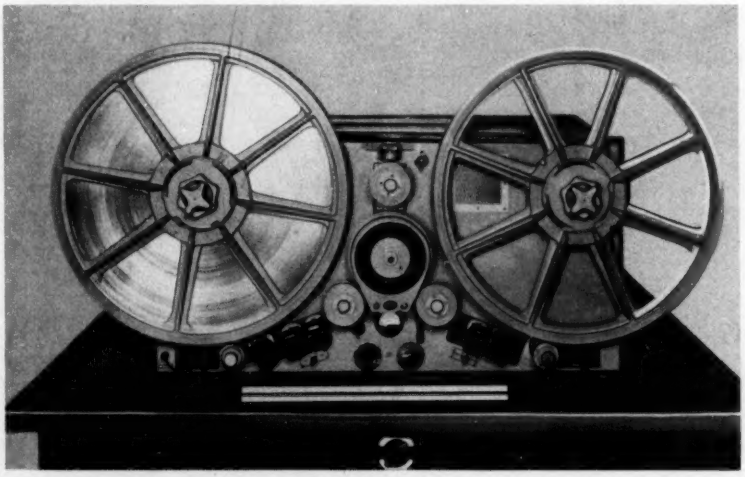


Abb. 8. Stahlbandmaschine

Die Stahlbandmaschine hat eine gewisse Anwendung gefunden, insbesondere bei Proben, damit die Künstler ihre eigenen Produktionen abhören und beurteilen können. Der Vorteil liegt dann darin, daß diese nach dem Abspielen wertlosen Aufnahmen wieder gelöscht werden können, ohne daß irgendein Materialverbrauch auftritt. Bei diesem Anwendungszweck hat sich auch die einfache Bedienung als vorteilhaft erwiesen, während bei allen Schallplattenverfahren immerhin geschultes Personal mit einem gewissen Fingerspitzengefühl notwendig ist. Außerdem hat sich die Stahlbandmaschine auf die ihr eigene Erschütterungsunempfindlichkeit ein Anwendungsgebiet geschaffen, Aufnahmen aus fahrenden Eisenbahnzügen, Flugzeugen, Luftschiffen, Dampfern und Wagen sind mit Erfolg durchgeführt worden. Nicht geeignet hat sich die Stahlbandmaschine dagegen für Anwendungszwecke erwiesen, bei denen es auf filmischen Schnitt ankam. Die Zusammenfügung von Teilaufnahmen von Stahlband macht erhebliche mechanische und magnetische Schwierigkeiten.

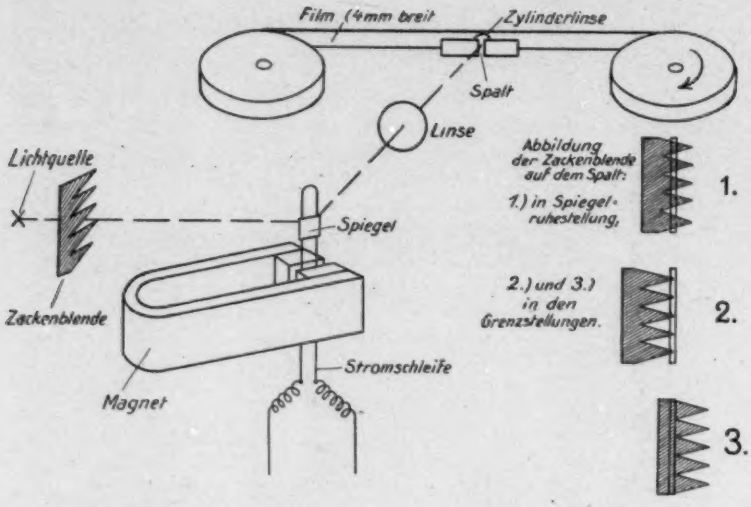


Abb. 9. Schematische Darstellung der Schallfilmaufzeichnung

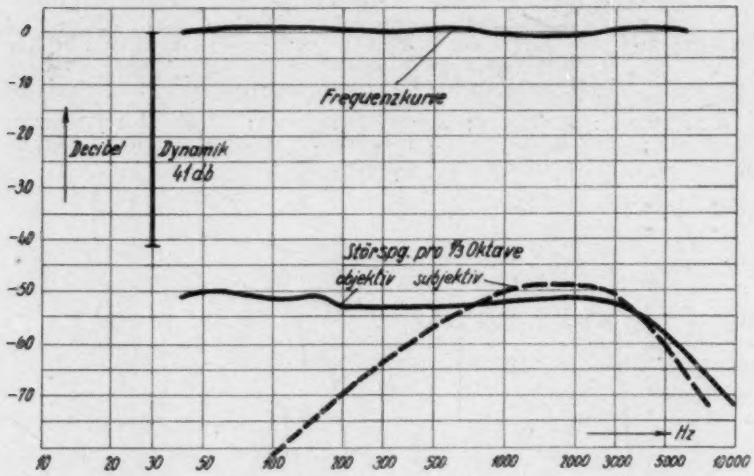


Abb. 10. Schallfilmverfahren

Aufnahmematerial: Agfa TF4; Filmbreite: 5,83 mm; Spaltbreite: 0,008 mm; Filmgeschwindigkeit: 45,6 cm/sec; Aufzeichnungsverfahren: Vielzackenschrift m. 14 Tonspuren; Breite der Filmspur: 2,4 mm; Wiedergabedauer einer Spule: 11 Minuten

Schallfilm

Es lag nahe, für diesen Zweck auf den Tonfilm zurückzugreifen, der ja die Schnittmöglichkeit in seinem Arbeitsgebiete von jeher ausgedehnt angewendet hat. Natürlich war es nicht notwendig, den breiten Normalfilm zu verwenden, da es nur auf die Aufzeichnung des schmalen Tonstreifens ankam. Es wurde daher ein Schmalfilmgerät durchgebildet, das den besonderen Anforderungen des Rundfunks angepaßt war. Da es sich darum handelte, vor allem auch das Originalnegativ wiederzugeben, erwies sich die Vielzackenschrift als die geeignetste Schriftart. Abb. 9 zeigt das Aufzeichnungsprinzip. Eine Zackenblende wird über einen Oszillographenspiegel und eine Linse auf einen Spalt abgebildet, vor dem der lichtempfindliche Film abläuft. Die Einrichtung ist so justiert, daß im Ruhezustand die Mitte des Bildes der Zackenblende auf den Spalt zu liegen kommt. Es entstehen dann auf dem Film gleichbreite belichtete und abgeschattete parallele Streifen. Wenn sich der Oszillographenspiegel unter dem Einfluß der Modulation dreht, verschiebt sich das Bild der Zackenblende nach der einen Richtung und nach der anderen, was eine Verbreiterung bzw. Verschmälerung der vom Licht getroffenen Spuren zur Folge hat. Bei der Wiedergabe bewirken diese parallel geschalteten Einzelspuren in Zackenschrift die Steuerung des auf eine Photozelle fallenden Lichtstromes in der üblichen Art. Die physikalischen Eigenschaften des Schallfilms dieser Art sind in Abb. 10 dargestellt. Die Frequenzkurve ist hervorragend gut. Die Dynamik ergibt einen Wert von 41 db. Durch zusätzliche Einführung einer Klartonsteuerung wird sich eine weitere Herabsetzung des Störgeräusches erreichen lassen.

Das Wiedergabegerät ist in Abb. 11 dargestellt. Anwendungsgebiete für den Schallfilm waren vor allem da zu erwarten, wo es auf bequemste Schnittmöglichkeit ankam, also insbesondere bei dramatischen Sendungen oder bei Großreportagen, z. B. von Städtebildern, bei denen die ursprünglich langen Aufnahme-

teile ausschnittsweise zu einer konzentrierten kurzen Darstellung aneinandergefügt werden müssen. Leider bringt der Film die für den Rundfunk ungewohnte und sicher auch nicht angenehme Eigenschaft der Lichtempfindlichkeit mit sich und die Notwendigkeit einer umständlichen und zeitraubenden Nachbehandlung.

Magnetophon

Eines der neuesten Verfahren auf dem Gebiete der Schallaufzeichnung, das gewissermaßen die Vorteile des Stahlbandes und des Tonfilms in sich vereint, ist das Magnetophon. Als Schallträger dient hier nicht mehr ein massives Stahlband, sondern ein filmischer Träger mit einer magnetisierbaren Oberfläche. Auch das Prinzip der Aufnahme ist vervollkommnet worden, insbesondere durch Anwendung eines einpoligen geschlossenen Sprech- und Hörkopfes. Die physikalischen Eigenschaften des Magnetophons sind in Abb. 12 dargestellt. Die Frequenzkurve ist als recht gut zu bezeichnen. Das dynamische Verhältnis beträgt 38 db. Es wird wahrscheinlich im weiteren Verlauf der Entwicklung noch verbessert werden können. Der besondere Vorteil des Magnetophons liegt darin, daß man verhältnismäßig lange Darbietungen geschlossen aufnehmen und wiedergeben kann, und daß das Schneiden auf die einfachste Weise möglich ist. Zudem sind die Apparaturen transportabel gehalten und erschütterungsunempfindlich. Die Betriebskosten sind gering, besonders wenn man von der Löschmöglichkeit Gebrauch macht. Der entscheidende Vorteil liegt aber wohl in der einfachen Schnittmöglichkeit. Zunächst steht zu erwarten, daß die magnetische Schallaufzeichnung, insbesondere der magnetische Film, dem Lichttonfilm dadurch unterlegen ist, daß man die Tonspur nicht sehen kann. Die optische Erkennungsmöglichkeit erleichtert den Schneidvorgang, wie die Erfahrungen im

Abb. 11. Schallfilmwiedergabegerät

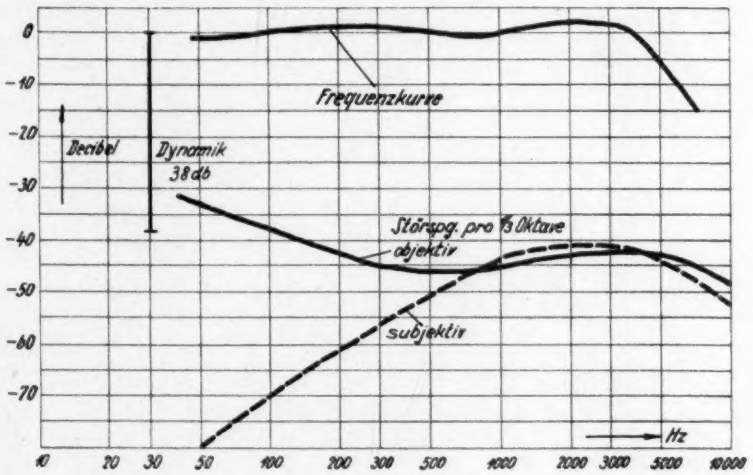


Abb. 12. Magnetophonverfahren

Aufnahmematerial: Sicherheitsfilm m. einer Spezialeisenschicht; Filmbreite: 6,5 mm; Filmdicke: 0,08 mm; Filmgeschwindigkeit: ca. 77 cm/sec Wiedergabedauer einer Spule: 20 Minuten

Tonfilmbetrieb zeigen, bedeutend. Es läßt sich jedoch auch mit dem Magnetophon eine fürs erste hinreichende Schnittmöglichkeit erzielen, da die Bremszeiten der Geräte sehr kurz sind.

Von dem Magnetophon darf man eine vielseitige Anwendungsmöglichkeit im Rundfunk-

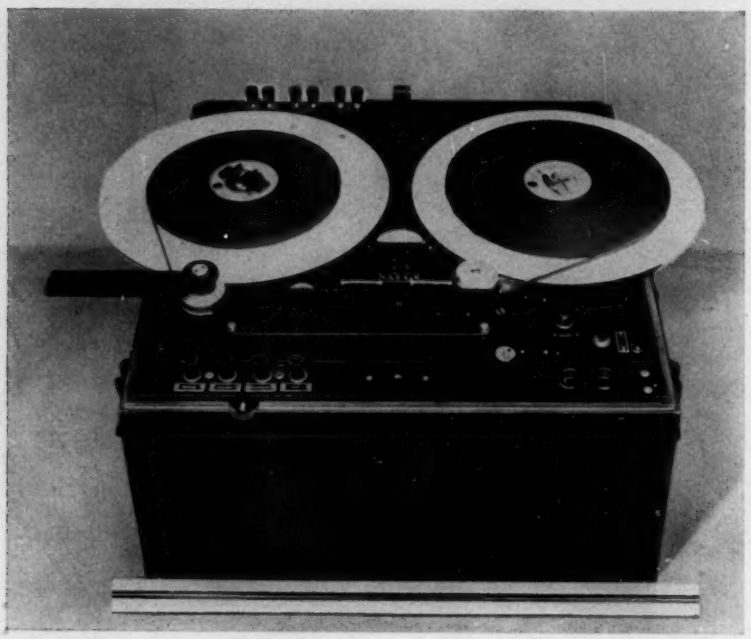


Abb. 13. Magnetophonmaschine

betriebe erwarten. Die derzeitige Form der Apparatur ist in Abb. 13 dargestellt.

Die Ausführungen über den heutigen Stand der Schallaufnahmetechnik wären nicht vollständig ohne die Anführung von zwei Verfahren, die z. Z. noch keine Einführung im Rundfunkbetriebe gefunden haben. Es handelt sich zunächst um das PHILIPS-MILLER-Verfahren. Hierbei wird der Schall mechanisch auf einen Filmstreifen aufgezeichnet und lichtelektrisch abgetastet. Als Schallträger dient ein durchsichtiger Film mit einer dünnen, lichtundurchlässigen, schneidbaren Oberfläche. Zur Aufzeichnung wird ein sehr stumpf geschliffener Stichel verwendet, der im Ruhezustand ein lichtdurchlässiges Band konstanter Breite aus der geschwärzten Lichtoberfläche herausschneidet. Unter dem Einfluß der Modulationsströme führt dieser Stichel Bewegungen senkrecht zum Schallträger aus. Beim tieferen Hineinsenken verbreitert sich die lichtdurchlässige Tonspur, beim Herausheben wird sie schmaler. Die entstehende Aufzeichnung entspricht der bekannten Eindoppelzackenschrift. Die Abtastung erfolgt in der beim Tonfilm üblichen Weise, jedoch besitzt das Verfahren den Vorteil, daß die Aufzeichnung unmittelbar, d. h. ohne photographische Nachbehandlung, abgehört werden kann. Dem PHILIPS-MILLER-Verfahren wird eine ausgezeichnete Übertragungstreue und Störgeräuschfreiheit nachgerühmt.

Schließlich wäre noch das Tefiphon-Verfahren zu nennen, welches die Schallplattenaufzeichnung auf einen schneidbaren Film überträgt. Es ist möglich, auf einen Normalfilm eine große Zahl nebeneinanderliegender Tonspuren aufzubringen. Diese enthalten allerdings nicht etwa, wie bei der Vielzackenschrift, die gleiche Modulation, sondern entsprechen nebeneinanderliegenden Rillen einer Schallplatte. Man kann sich das Tefiphonprinzip am besten dadurch klarmachen, daß man sich die geschlossene Filmschleife zu einem Zylindermantel sehr großen Durchmessers und ganz geringer Höhe aufgerollt denkt, der dann mit einer Phonographenwalze zu vergleichen ist. Von diesem Aufzeichnungsprinzip sind etwa dieselben Eigenschaften wie von der Schallfolie zu erwarten. Der Vorteil dürfte vor allem in der sehr langen Aufnahmedauer liegen.

(Eingegangen am 9. Juni 1938.)

Über die Schallfortpflanzung in Rohren

Von W. Bürk und H. Lichte

Mitteilung aus dem Laboratorium der Telefunken-G. m. b. H.

(Mit 16 Textabbildungen)

1. Einführung

Bereits früher erschien ein Aufsatz über die Fortpflanzung des Schalles in festwandigen Rohren[1]), in dem die theoretischen Grundlagen unter Berücksichtigung verschiedener Verlustquellen an Hand des einschlägigen Schrifttums erörtert wurden. Die angestellten Messungen an Rohren zwischen 1,5 und 50 mm Weite ergeben Werte, die sich gut mit den nach der KIRCHHOFFschen Theorie berechneten Werten decken. Die Abnahme der Schallamplitude A mit der Rohrlänge z erfolgt nach einem Exponentialgesetz: $A = A_0 \cdot e^{-\delta z}$, wobei der Dämpfungsfaktor δ nach Formel (8) der erwähnten Arbeit berechnet wird:

$$\delta = \left\{\sqrt{\frac{\mu}{\varrho}} + \left(\sqrt{\gamma} - \frac{1}{\sqrt{\gamma}}\right) \cdot \sqrt{\frac{5\mu}{2\varrho}}\right\} \cdot \frac{\sqrt{\pi f}}{a\, r}.$$

Es bedeutet dabei:

ϱ = Mediumdichte,
μ = Koeffizient der inneren Reibung im Medium,
γ = Verhältnis der spezifischen Wärmen,
a = Schallgeschwindigkeit im freien Medium,
f = Frequenz der Schwingung,
r = Rohrradius.

Mit dem Einsatz der entsprechenden Konstanten für Luft erhält man für den Dämpfungsfaktor

$$\delta = 3{,}1 \cdot 10^{-5} \frac{\sqrt{f}}{r}$$

und hieraus die Amplitudenabnahme in Dezibel pro 10 m Rohrlänge zu

$$0{,}27 \frac{\sqrt{f(\mathrm{Hz})}}{r(\mathrm{cm})}.$$

[1]) H. LICHTE, Elektr. Nachr.-Techn. 4 (1927), S. 304, hier weiteres Schrifttum.

2. Zweck der Untersuchungen

Für manche Fälle bei der elektroakustischen Schallübertragung ist die Einführung einer frequenzunabhängigen Schallverzögerung von Bedeutung. Es sollte daher untersucht werden, ob für solche Zwecke die Verwendung von Rohrleitungen brauchbar und wirtschaftlich durchführbar ist. Wie aus den früheren Untersuchungen hervorgeht, nimmt die Dämpfung bei der an sich sonst sehr erwünschten Verkleinerung der Rohrdurchmesser stark zu. So beträgt beispielsweise für 1 cm Rohrradius die Dämpfung auf 10 m für 50 Hz 1,9, für 1000 Hz 8,5, für 10000 Hz 27 Dezibel. Rechnet man nun für eine Verzögerungsstrecke von etwa 60 m, wie sie als Lautsprecherabstand bei Großflächenbesprechung angesetzt wird, die notwendige maximale Zwischenverstärkung aus, so käme man bei 10000 Hz Übertragungsgrenze für das benutzte Rohr von 2 cm Durchmesser auf eine rund 10^8fache Verstärkung. Bei 10 cm Rohrdurchmesser ist dagegen die notwendige maximale Verstärkung nur etwa 40fach. Man sieht hieraus, daß man aus wirtschaftlichen Gründen zu großem Rohrdurchmesser übergehen muß.

Voraussetzung für die störungslose Schallfortpflanzung in Rohren ist nun die Forderung, daß am Rohranfang auftreffender Schall sich im Rohr als ebene Wellenbewegung fortsetzt, wobei die Wellenflächen senkrecht auf der Rohrmittelachse stehen. Diese Forderung ist, wie RAYLEIGH[2]) gezeigt hat, immer erfüllt, wenn die Rohrquerdimensionen klein zur Wellenlänge sind, für den Fall eines Zylinderrohres, wenn die zu übertragende Wellenlänge

[2]) LORD RAYLEIGH, Theory of Sound, London 1929, Vol. II, S. 161.

größer als 3,413 r ist und damit die erzwungene Schwingung in ihrer Frequenz niedriger als die tiefste Quer-Eigenschwingung des Rohres liegt. Damit ist bei der oben geforderten Durchmesservergrößerung für die ungestörte Schallübertragung eine Grenze gezogen, die, eine obere Übertragungsgrenze von etwa 10000 Hz vorausgesetzt, bei Durchmessern in der Größe von 1 cm liegt. Da derartig enge Rohre wegen ihrer starken Dämpfung nicht verwendbar sind, ist zu untersuchen, was für Störungen die Überschreitung der RAYLEIGHschen Bedingung in der Schallfortpflanzung bringt, in welcher Größe sie auftreten und ob und wie sie zu bekämpfen sind.

3. Untersuchungen an einem weiten Rohr

Bei den im folgenden beschriebenen Versuchen wurde ein eisernes Siederohr von 14,3 cm lichter Weite und 7,05 m Länge benutzt, das am Ende, wie später beschrieben, praktisch reflexionsfrei abgeschlossen war. Bei dem gewählten Rohrdurchmesser ist die RAYLEIGHsche Bedingung für ebene Wellenausbreitung im Rohr nur bis zur Übertragungsfrequenz 1400 Hz erfüllt. Für das Geschwindigkeitspotential Φ unterhalb der kritischen Frequenz gilt nach RAYLEIGH (s. Anm. 2, Formel 12, S. 161) ein Ausdruck in Reihenform:

$$\Phi = \beta_0 \cdot e^{jk(at-z)} + \beta_1 u_1 \cdot e^{-\mu_1 z} \cdot e^{jkat} + \beta_2 u_2 \cdot e^{-\mu_2 z} \cdot e^{jkat} + \cdots .$$

Hierin bedeutet: $k = \frac{2\pi}{\lambda}$, wenn λ die Wellenlänge der aufgedrückten Schwingung ist; $-\mu_n^2 = k^2 - p_n^2$, wenn $p_n = \frac{2\pi}{\lambda_n}$ und λ_n die Wellenlänge der n-ten freien Quer-Eigenfrequenz des Rohres ist. β_n sind konstante Koeffizienten (Amplitudenanteile), deren Größe von den Rand- und Anfangsbedingungen abhängen; a ist die freie Schallgeschwindigkeit und t die Zeit. Für reelle μ_n nehmen mit wachsendem Abstand z vom Rohranfang die den Eigenfunktionen u_n entsprechenden Glieder ab, nur das erste Glied bleibt übrig.

Die Schallwellen werden also schließlich eben, auch wenn am Anfang des Rohres keine ebenen Wellen entstehen (z. B. durch eine punktförmige Schallquelle) oder die Schallanregung am Anfang unsymmetrisch bezüglich der Rohrachse erfolgt.

Aus dem Ausdruck für das Geschwindigkeitspotential erhält man den Schalldruck

$$P = -\varrho \frac{d\Phi}{dt} = -jkar\Phi$$

und die Luftgeschwindigkeit in Richtung der Rohrachse z zu

$$V_z = \frac{d\Phi}{dz} = -e^{jkat} \cdot \{jk\beta_0 \cdot e^{-jkz} + \mu_1\beta_1 u_1 \cdot e^{-\mu_1 z} + \mu_2\beta_2 u_2 \cdot e^{-\mu_2 z} + \cdots\}.$$

Die Realteile dieser Ausdrücke lauten:

$$\Re e\,(P) = ka\varrho \cdot \sin(kat) \cdot \{\beta_0 \cos(kz) + \beta_1 u_1 \cdot e^{-\mu_1 z} + \beta_2 u_2 \cdot e^{-\mu_2 z} + \cdots\} - \beta_0 ka\varrho \cdot \cos(kat) \cdot \sin(kz),$$

$$\Re e\,(V_z) = -\cos(kat) \cdot \{k\beta_0 \cdot \sin(kz) + \mu_1\beta_1 u_1 \cdot e^{-\mu_1 z} + \mu_2\beta_2 u_2 \cdot e^{-\mu_2 z} + \cdots\} + k\beta_0 \cdot \sin(kat) \cdot \cos(kz).$$

Die Schallenergie pro Flächeneinheit ist gegeben durch $\frac{1}{t} \cdot \int_0^t \frac{1}{2}\,\Re e\,(P) \cdot \Re e\,(V_z)\,dt$; nach Integration über die Querschnittsfläche σ und Division durch die Fläche ergibt sich für die Schallenergie (da die Integrale $\iint u\,d\sigma$, genommen über die Eigenfunktionen u_n, sämtlich verschwinden), der Ausdruck $\frac{1}{2}k^2\beta_0^2 a\varrho$, wobei $k\beta_0$ die Maximalgeschwindigkeit $V_{z\,max}$ und $a\varrho = \left(\frac{P}{V_z}\right)_{max}$ den Strahlungswiderstand für die ebene Welle darstellt, der, ebenso wie die freie Schallgeschwindigkeit a und die Luftdichte ϱ, für alle Frequenzen unterhalb der kritischen Grenze konstant ist.

Im Gebiet oberhalb der kritischen Frequenz setzt sich das Geschwindigkeitspotential aus Gliedern der Form

$$\beta_n u_n \cdot e^{j\left(kat - \sqrt{k^2 - p_n^2} \cdot z\right)}$$

zusammen. Betrachtet man nur das Frequenzgebiet in der Nachbarschaft einer Rohreigenfrequenz (Querschwingung) mit der Wellenlänge $\lambda = \frac{2\pi}{p}$, so erhält man

$$\Re e\,(P) = \beta u ka\varrho \cdot \sin\left(kat - \sqrt{k^2 - p^2} \cdot z\right)$$

und

$$\Re e\,(V_z) = \beta u \sqrt{k^2 - p^2} \cdot \sin\left(kat - \sqrt{k^2 - p^2} \cdot z\right).$$

Die in Richtung der Rohrachse z fortschreitende Schallenergie der Größe

$$\frac{1}{2}\,\beta^2\,u^2\,k\,a\,\varrho\,\sqrt{k^2-p^2}$$

verschwindet in der Nähe der Eigenwerte, d. h. bei den Frequenzen, wo Querschwingungen im Rohr auftreten, hört die Energiefortpflanzung längs der Rohrachse auf. Der Strahlungswiderstand hat die Form $\left(\frac{P}{V_z}\right)_{max} = a\,\varrho\cdot\frac{k}{\sqrt{|k^2-p^2|}}$, steigt also in der Nähe der Eigenfrequenzen auf sehr hohe Werte, so daß gleichzeitig mit dem Aufhören der Energiefortpflanzung die am Rohranfang befindliche Schallquelle, die im regulären Frequenzbereich in Leistungsanpassung arbeiten soll, bei den Eigenfrequenzen im Leerlauf arbeitet, was ein starkes Ansteigen des Schalldruckes im Rohr zur Folge hat. Daß diese aus den theoretischen Überlegungen vorauszusagenden Erscheinungen tatsächlich auftreten, zeigen die folgenden experimentellen Untersuchungen.

Das verwendete Eisenrohr von 7,15 cm innerem Radius bekam 20 cm hinter dem Anfang und dann in Abständen von je 95 cm kreisrunde Ausschnitte von 3 cm Durchmesser, die mit genau passenden Flanschdeckeln verschlossen werden konnten und zur Einführung der Meßmikrophone dienten. Das Ende des Rohres wurde mit einer etwa 3 m langen Filzrolle abgeschlossen, deren innerer Durchmesser vom inneren Rohrdurchmesser allmählich bis auf Null abnahm, während der Außendurchmesser etwa den doppelten Rohraußendurchmesser hatte. Es sollte hierdurch ein möglichst vollkommen absorbierender frequenzunabhängiger Abschluß des Rohres erreicht werden. Die Messungen zeigten, daß, außer bei tiefen Frequenzen, diese Anordnung sehr wirksam war. Die durch stehende Wellen hervorgerufenen Übertragungsmaß-Schwankungen betrugen z. B. um 500 Hz herum nur $\pm$ 12% und wurden mit steigender Frequenz immer geringer.

Die beiden gleichzeitig an verschiedenen Rohrstellen zu betreibenden Meßmikrophone arbeiteten über zwei getrennte Verstärker entweder auf einen Oszillographen oder auf ein automatisches Spannungsregistriergerät. Die Rohranregung ging von einer Tonsummeranordnung mit Heul- und Schaltgerät aus über Verstärker an ein elektrodynamisches Trichterlautsprechersystem (Riffelfaltentyp) mit breitem und ausgeglichenem Frequenzband, das mit einem Gummischlauch von 15 mm Weite mit der eisernen Rohrabschlußwand am Anfang des Rohres verbunden war. Diese Abschlußwand hatte eine Schalleintrittsöffnung von 15 mm Durchmesser und konnte so eingestellt werden, daß die Eintrittsöffnung zentral in der Rohrachse oder exzentrisch, äußerstenfalls ganz am Rand des Rohres lag. Die Anregung des Rohres war also, bedingt durch die Kleinheit der Eintrittsöffnung, praktisch punktförmig. Die ganze Anordnung ist schematisch in Abb. 1 dargestellt.

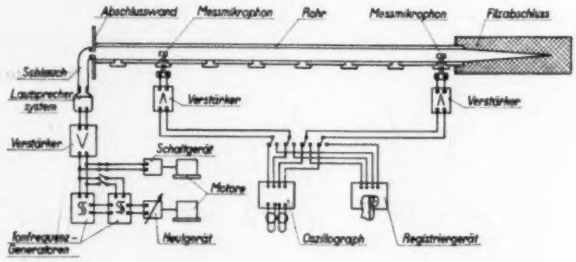


Abb. 1. Schematische Darstellung der Meßschaltung für die Untersuchung der Schallfortpflanzung in einem Rohr

Für die Registrierung des Übertragungsmaßes, das aus den Anzeigen des Spannungsregistriergerätes ermittelt werden konnte, wurde nur einer der beiden Tonfrequenzgeneratoren benutzt, dessen Frequenz vermittels des motorisch angetriebenen Heulgerätes langsam, mit regelbarer Geschwindigkeit durch das ganze Tonfrequenzband gleiten konnte. Durch Eichungen wurde der Ablauf des Registriergerätes mit der Geschwindigkeit des Gleittons in Verbindung gesetzt. Als Meßmikrophone für den Schalldruckpegel dienten zwei gleiche Kondensatormikrophone in Spezialausführung[3]), die längs eines Durchmessers im Rohr ver-

[3]) Die Mikrophone sind, ebenso wie die später angeführten Geschwindigkeitsmikrophone, von E. Gerlach gebaut und zu den hier beschriebenen Versuchen zur Verfügung gestellt worden.

schoben werden konnten. Die Kapseln hatten in der Schutzhülle 24 mm Außendurchmesser und 14 mm freien Membrandurchmesser, besaßen hohe Empfindlichkeit und gemäß ihrer Kleinheit bis zu sehr hohen Frequenzen herauf eine sehr ausgeglichene Frequenzkurve. Ein solches, vollständiges Meßmikrophon und eine einzelne Kapsel in Schutzhülse sind in Abb. 2 Mitte abgebildet.

Das Ergebnis einer Schalldruckregistrierung ist in Abb. 3 dargestellt. Bei allmählich hochgleitender Frequenz ist in den Kurven *a* und *a'* der Schalldruckverlauf bei konzentrischer Rohranregung (Meßmikrophon ebenfalls in Rohrachse) in 115 cm Entfernung vom Rohranfang, in den Kurven *b* und *b'* in 685 cm Entfernung

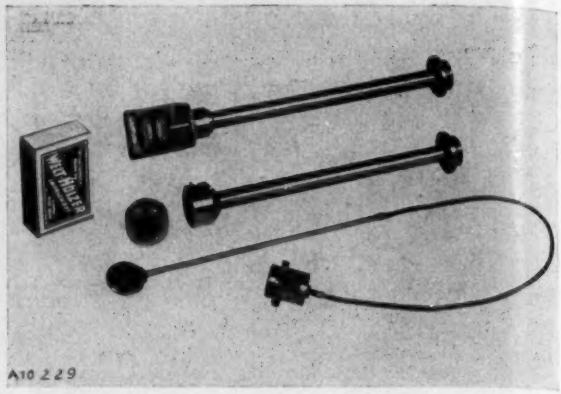


Abb. 2. Verschiedene Meßmikrophone. Oben: Geschwindigkeits-Kristallmikrophon, Mitte: Kondensator-Druckmikrophon und einzelne Mikrophonkapseln, unten: Geschwindigkeits-Kristallmikrophon in besonders kleiner Ausführung

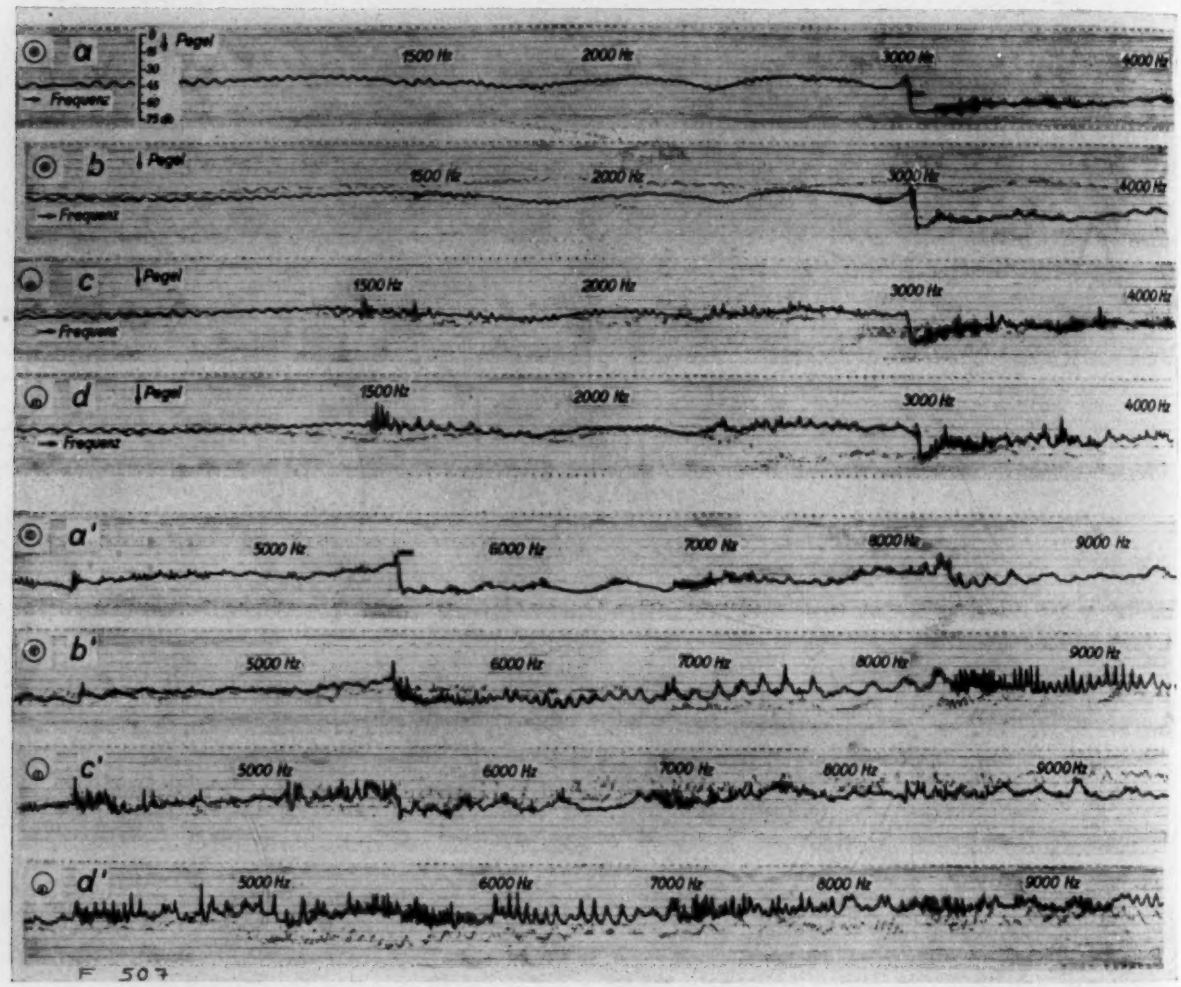


Abb. 3. Schalldruckverlauf im Rohr abhängig von der Frequenz: *a* und *a'* nahe am Rohranfang bei zentraler Rohranregung, *b* und *b'* nahe am Rohrende bei zentraler Rohranregung, *c* und *c'* nahe am Rohranfang bei exzentrischer Rohranregung, *d* und *d'* nahe am Rohrende bei exzentrischer Rohranregung

vom Rohranfang zu sehen. Die Kurven *c* und *c'* bzw. *d* und *d'* geben den entsprechenden Schalldruckverlauf bei möglichst exzentrischer Rohranregung. Wie man sieht, beginnt bei dem Sonderfall konzentrischer Anregung erst bei etwa 3000 Hz das Gebiet starker Unregelmäßigkeiten in der Schallfortpflanzung. Die kleinen Schwankungen unterhalb 3000 Hz sind auf Resterscheinungen durch stehende Wellen und Unregelmäßigkeiten der Anregung durch den Lautsprecher, dessen Frequenzkurve bei konstanter Klemmenspannung noch Schwankungen bis zum Verhältnis 1 : 3 aufwies, zurückzuführen. Bei etwa 3000 Hz setzt die erste starke Querschwingung ein, verbunden mit dem schon durch die Rechnung erwarteten Hochschnellen des Strahlungswiderstandes im Rohr, das in der Nähe des Rohranfangs (Abb. 3a) und am Ende (3b) an dem plötzlichen steilen Anstieg der Schalldrücke zu beobachten ist. Außerdem sind viele heftige Schwankungen im Schalldruck in unregelmäßiger Folge für nahezu alle Frequenzgebiete oberhalb 3000 Hz vorhanden, unterbrochen von besonders steilen Druckanstiegen bei einigen bevorzugt ausgebildeten Querschwingungen (5400, 8200 Hz); durch diese Druckerhöhungen bei hohen Frequenzen entstehen außerdem häufig für nicht ganz reine Sinustöne Klirrfaktorerhöhungen. Bei exzentrischer Rohranregung ist der im vorigen Fall nur andeutungsweise erkennbare Beginn der Unregelmäßigkeiten um 1500 Hz bereits deutlich ausgebildet und fällt in hinreichender Übereinstimmung mit den RAYLEIGHschen Betrachtungen in die Nähe der theoretisch ermittelten Grenzfrequenz (1400 Hz). Die Amplitudenschwankungen betragen, wie man erkennt, bei exzentrischer Anregung bei 1500 Hz auf noch nicht 7 m Rohrlänge etwa 30 db im Druck, also schon 1 : 32, bei 3000 Hz unabhängig von der Rohranregung etwa 40 db, also 1 : 100. In der Nähe der Frequenz 3000 Hz wurde der genaue Verlauf des Druckes in 115 cm und 685 cm Entfernung vom Rohranfang und der Absolutwert des Übertragungsmaßes für das 570 cm lange Zwischenstück punktweise mit anzeigenden Instrumenten abgelesen und in Abb. 4 dargestellt. Man erkennt, daß das frequenzmäßig bei steigender Frequenz etwas verspätete Ansteigen des Druckes in größerer Entfernung vom Rohranfang für das Übertragungsmaß eine tiefe Senke entstehen läßt, die wiederum das Einsetzen von Querschwingungen auch theoretisch erklärt (Aufhören der Energiefortpflanzung in Richtung der Rohrachse).

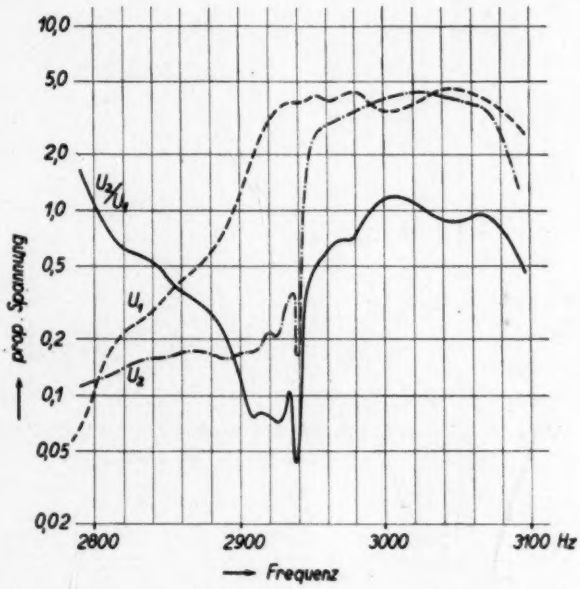


Abb. 4. Verlauf des Schalldruckes am Anfang und Ende des Rohres und Übertragungsmaß in der Nähe der Frequenz 3000 Hz bei zentraler Rohranregung

Aus den registrierten Werten in Abb. 3 wurden die über ein Frequenzgebiet von je etwa 100 Hz gemittelten Absolutwerte des Übertragungsmaßes über 570 cm Rohrlänge in Abb. 5 für zentrale und in Abb. 6 für exzentrische Anregung ermittelt (kleine Kreise) und dazu als Streuung nach oben die maximale Differenz zwischen unterem Eingangs- und oberem Ausgangsdruckpegel, als Streuung nach unten die maximale Differenz zwischen oberem Eingangs- und unterem Ausgangsdruckpegel aufgetragen. Man sieht hieraus, daß das verwendete Rohr für Übertragungszwecke bei zentraler Anregung bis 3000 Hz, bei exzentrischer Anregung nur bis 1500 Hz oberer Grenzfrequenz praktisch störungsfrei arbeitet.

Während bei den bisherigen Messungen die Meßmikrophone in der Mittelachse des Rohres

standen, wurde nun ihre Verschiebbarkeit längs eines Rohrdurchmessers zur Feststellung der Druckverteilung im Querschnitt des Rohres ausgenutzt. Abb. 7 zeigt die Schalldruckverteilung bei verschiedenen Frequenzen (950, 1500, 3000 und 5500 Hz) bei zentraler Rohranregung, und zwar ist von den beiden für jede Frequenz ermittelten Kurven jeweils die obenliegende in 115 cm, die untenliegende Kurve in 685 cm vom Rohranfang gerechnet gültig. Abb. 8 enthält die entsprechenden, für exzentrische Rohranregung gültigen Werte. Wie man sieht, ist für niedrige Frequenzen der Druck über den Querschnitt konstant, während bei hohen Frequenzen Gebiete hohen Druckes mit solchen niedrigen Druckes abwechseln können (stabile Querschwingungen). Bemerkenswert ist, wie stark die Druckverteilung bei 1500 Hz in ihrem Verlauf von der Anregung abhängt.

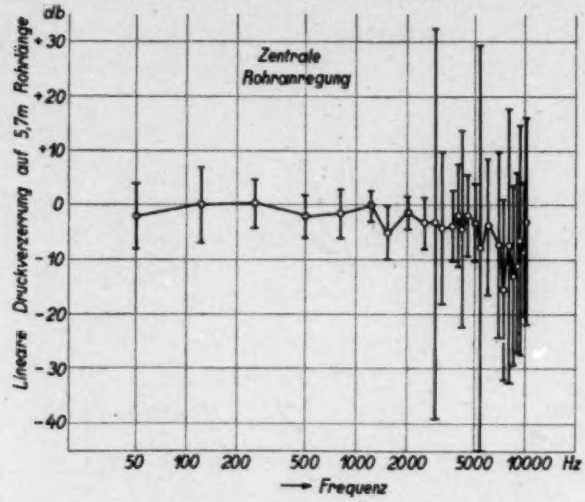


Abb. 5. Übertragungsmaß des Rohres für zentrale Anregung mit maximal möglicher Streuung

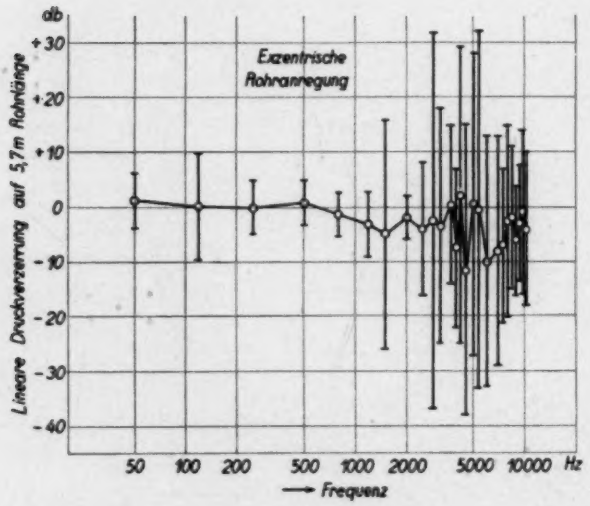


Abb. 6. Übertragungsmaß des Rohres für exzentrische Anregung mit maximal möglicher Streuung

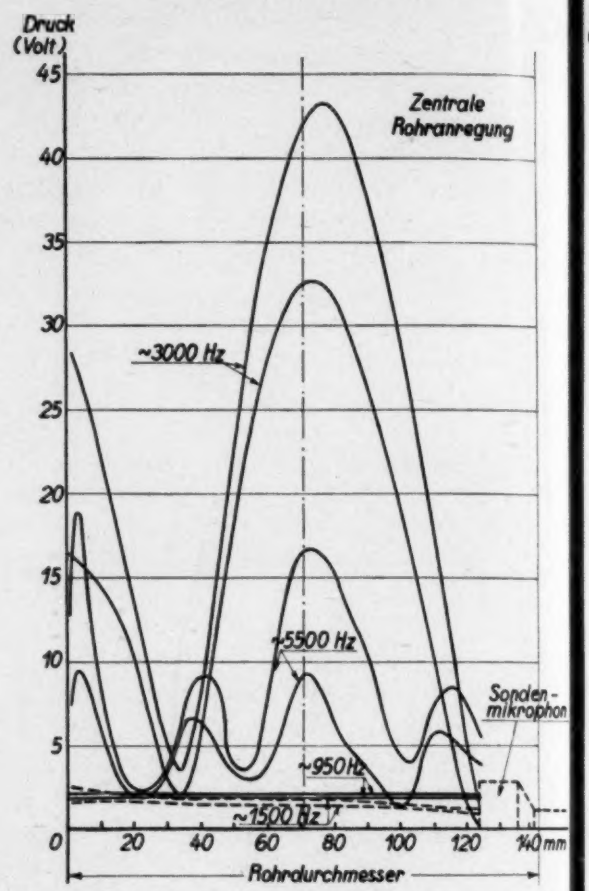


Abb. 7. Schalldruckverteilung längs eines Rohrdurchmessers für verschiedene Frequenzen bei zentraler Anregung für den Anfang und das Ende des Rohres

Nach diesen Untersuchungen, die den experimentellen Nachweis für das Vorhandensein stabiler Querschwingungen erbringen und das Auftreten starker Schwankungen der Amplitudencharakteristiken im Störungsgebiet zeigen, interessieren auch die Verhältnisse im Rohr bezüglich Fortpflanzungsgeschwindigkeit und Laufzeiten. In einer früheren Arbeit ist ausführlich über die Bedeutung und Messung der Laufzeiten in vierpolähnlichen Systemen

berichtet worden[4]). Aus den Argumenten der sin-Glieder bei den Ausdrücken für Druck und Geschwindigkeit nach den RAYLEIGHschen Ansätzen im Irregularitätsgebiet des Rohres, die die Form $k\,a\,t - \sqrt{k^2 - p^2} \cdot z$ haben, läßt sich

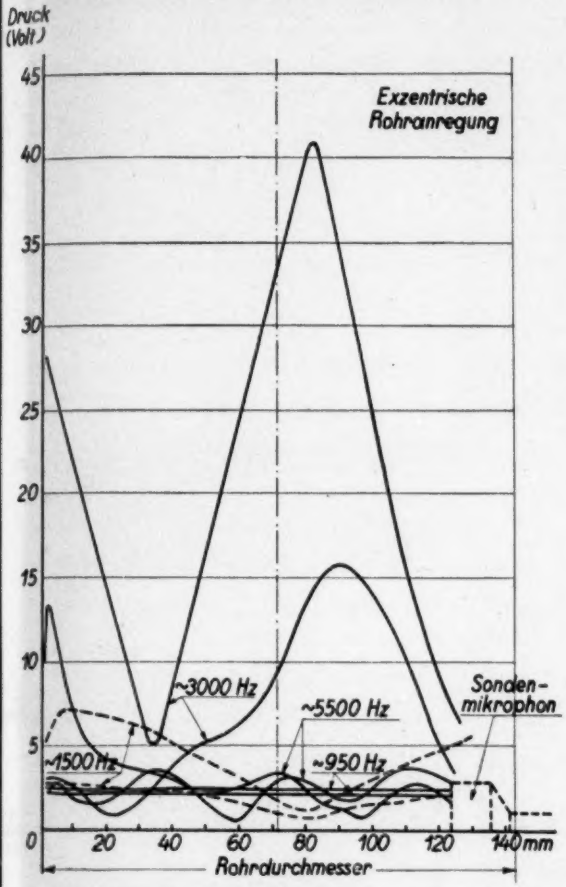


Abb. 8. Schalldruckverteilung längs eines Rohrdurchmessers für verschiedene Frequenzen bei exzentrischer Anregung für den Anfang und das Ende des Rohres

die Phasengeschwindigkeit V zu $\frac{z - z'}{t - t'} = \frac{k a}{\sqrt{k^2 - p^2}}$ in der Nähe der Rohrquerresonanzen bestimmen. Daraus ergibt sich die Gruppengeschwindigkeit U zu $\frac{d(k\,V)}{d\,k} = \frac{d}{d\,k}\left(\frac{k^2\,a}{\sqrt{k^2 - p^2}}\right) = k\,a \cdot \frac{k^2 - 2\,p^2}{(k^2 - p^2)^{2/3}}$; wie man sieht, kann in der Umgebung der Rohreigenfrequenzen die Gruppengeschwindigkeit alle Werte zwischen $-\infty$ und $+\infty$ durchlaufen. Den experimentellen Beweis hierfür bringen die oszillographischen Aufnahmen a, b und c der Abb. 9. Die oberste Schleife α liefert die Zeitmarke (500 Hz mit 50 Hz moduliert), die Schleife β ist an das Meßmikrophon in 115 cm Abstand vom Rohranfang, die Schleife γ an das Mikrophon am Rohrende (in 685 cm Abstand vom Rohranfang) angeschlossen. Als Prüfschall wird ein langsam schwebender Doppelton verwendet, der bei gleichbleibender Schwebungsfrequenz zeitlich in seiner Frequenz langsam geändert wird. Der zeitliche Abstand der Schwebungsminima der von den Schleifen β und γ aufgezeichneten Schalldruckkurven läßt auf die Laufzeiten im zwischenliegenden Rohrstück schließen. Im regulären Frequenzgebiet des Rohres bis 1500 Hz ergab sich für alle Frequenzen ein unveränderlicher Minimumabstand von etwa 17 mm/sec (Laufzeit $= +17$ mm/sec), der auf eine normale Schallfortpflanzungsgeschwindigkeit von etwa 340 m/sec schließen läßt. Im irregulären Gebiet dagegen erhält man Bilder wie in Abb. 9a, b und c. Die Laufzeiten nehmen positive und negative Werte an, deren Absolutgrößen kleiner oder größer als der Wert im regulären Frequenzbereich ausfallen. So entspricht beispielsweise dem in Bild 9c gezeigten Fall eine Schallgeschwindigkeit von nur 29 m/sec im Rohr.

Wie früher gezeigt[4]), hängen die starken Amplitudengangschwankungen eng mit großen Laufzeitdifferenzen zusammen. Das untersuchte Rohr kann als mehrfach zusammengesetzter Schwingkreisvierpol aufgefaßt werden und weist damit alle Übertragungsmerkmale eines solchen auf; die gezeigten Oszillogramme liefern den Beweis für die Richtigkeit einer solchen Auffassung. Ebenso gute Übereinstimmung mit den entsprechenden Vorgängen in Schwingkreisvierpolen und mit Hallerscheinungen[5]) zeigen die Oszillogramme von plötzlich ein- und ausgeschalteten Sinustönen im Rohr. Im regulären Frequenzbereich erscheint der ursprüngliche Vorgang praktisch ungeändert nach Durchlaufen des Rohres wieder (Abb. 9d); aus dem Bild erkennt man gleichzeitig den guten Rohrabschluß durch die Filz-

[4]) W. BÜRK und H. LICHTE, Elektr. Nachr.-Techn. **15** (1938), S. 78 ff.

[5]) W. BÜRK, P. KOTOWSKI und H. LICHTE, Elektr. Nachr.-Techn. **13** (1936), S. 268.

verlängerung daran, daß ein Reflexionsecho kaum sichtbar wird. Im Frequenzgebiet oberhalb 1500 Hz dagegen entstehen aus den plötzlich geschalteten Sinuszügen stark verzerrte Gebilde mit oftmals sekundenlangen Nachhallerscheinungen (Abb. 9e—9l) und dies beim Durchlaufen des kaum 6 m langen Rohrstückes. Die Bilder 9k und 9l zeigen die Ausgleichserscheinungen bei Frequenzen mit maximalem Druck (Resonanzspitze), wo die langen Laufzeiten auffallen, bei zentraler (*k*) und exzentrischer (*l*) Anregung des Rohres; in 9e—9i sind

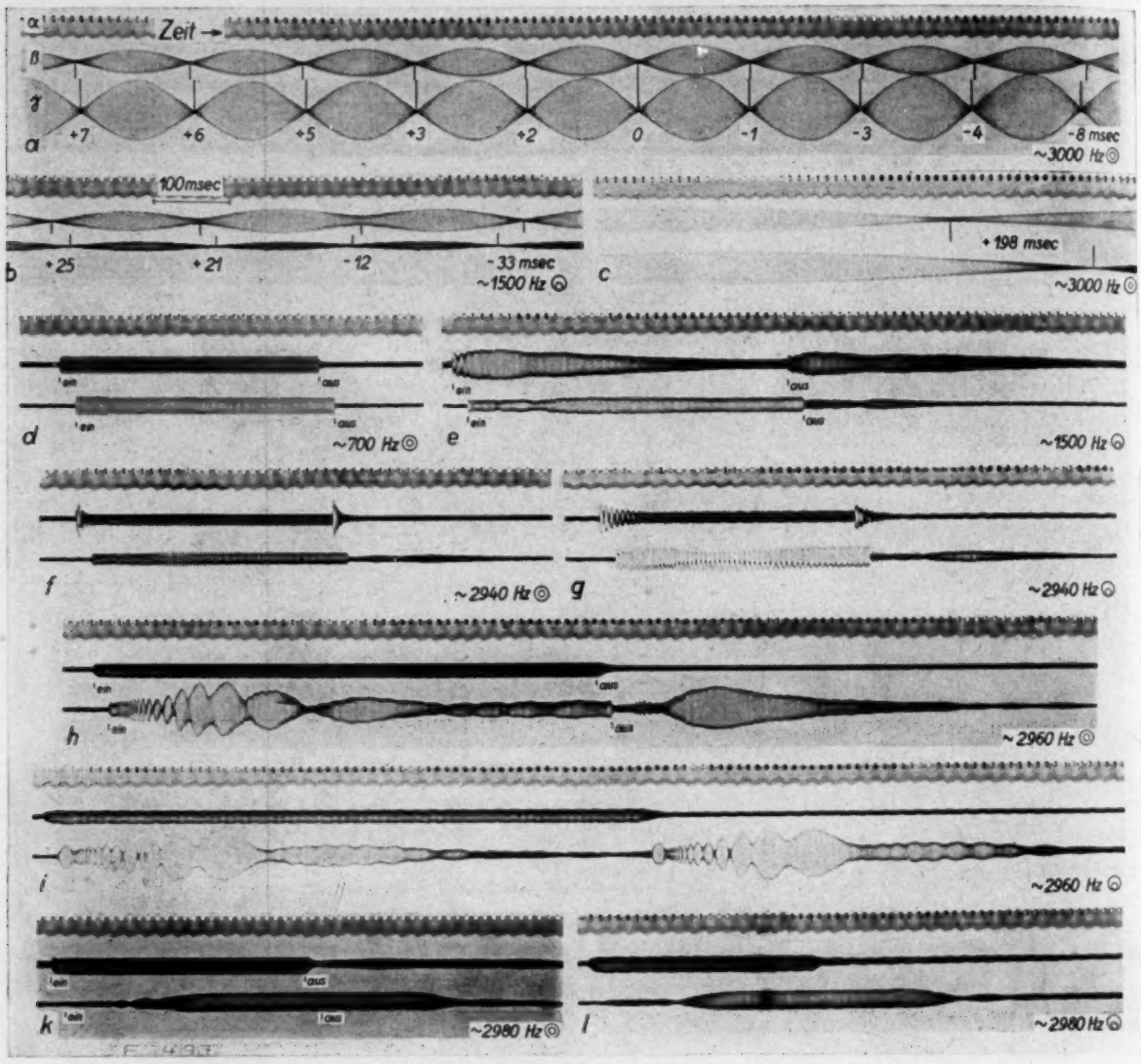


Abb. 9. Oszillographische Aufnahmen mit Doppelgleittönen (*a*, *b*, *c*) und geschalteten Sinustönen (*d* bis *l*) zur Ermittlung der Laufzeiten und Ausgleichserscheinungen im Rohr:

a) Doppelgleittonaufnahme bei zentraler Anregung um 3000 Hz herum; b) Doppelgleittonaufnahme bei exzentrischer Anregung um 1500 Hz herum; c) Doppelgleittonaufnahme bei zentraler Anregung in der Nähe von 3000 Hz bei besonders kleiner Schallfortpflanzungsgeschwindigkeit (29 m/sec); d) geschalteter Sinuston bei zentraler Anregung, etwa 700 Hz (regulärer Frequenzbereich); e) geschalteter Sinuston bei exzentrischer Anregung, etwa 1500 Hz; f) geschalteter Sinuston bei zentraler Anregung, etwa 2940 Hz; g) geschalteter Sinuston bei exzentrischer Anregung, etwa 2940 Hz; h) geschalteter Sinuston bei zentraler Anregung, etwa 2960 Hz, tiefes Minimum; i) geschalteter Sinuston bei exzentrischer Anregung, etwa 2960 Hz, tiefes Minimum; k) geschalteter Sinuston bei zentraler Anregung, etwa 2980 Hz, hohes Maximum; l) geschalteter Sinuston bei exzentrischer Anregung, etwa 2980 Hz, hohes Maximum

die Ausgleichserscheinungen im Minimum bzw. auf Flanken der „Rohrfrequenzkurve" zu sehen.

Um Aufschlüsse über die Luftgeschwindigkeit und deren Richtung im Rohr zu erhalten, wurden für die folgenden Versuche an Stelle der Druckmikrophone Kristall-Geschwindigkeitsmikrophone mit extrem kleinen Abmessungen

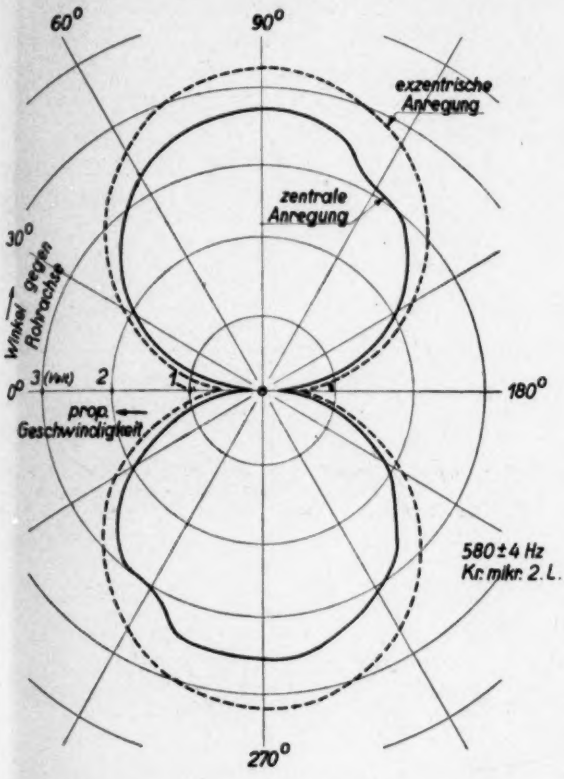


Abb. 10. Mikrophoncharakteristik eines Geschwindigkeitsmikrophons im Rohr bei 580 Hz Tonfrequenz bei zentraler und exzentrischer Anregung

benutzt. In Abb. 2 oben und unten sind zwei verschiedene Ausführungsformen abgebildet. Das untere Modell ist als Meßsonde in flacher Form mit einer Gesamtdicke von 3 mm und einem Außendurchmesser von 21 mm ausgeführt; der Durchmesser der teilweise biegsamen Zuleitung beträgt ebenfalls 3 mm. Die Empfindlichkeit dieser Mikrophone betrug etwa $\frac{1}{20}$ bis $\frac{1}{5}$ der vorher verwendeten hochempfindlichen Druckmikrophone.

Die Geschwindigkeitsmikrophone waren nun in der Rohrmitte um eine senkrecht zur Rohrachse stehende Achse drehbar angeordnet, wobei außen am Rohr zur Ablesung der Winkelstellung eine Skala mit Gradeinteilung angebracht war. Es wurde bei Dauerton im Rohr gemessen. Im regulären Frequenzbereich ergaben sich Richtkurven (Spannung vom Mikrophon abhängig von der Stellung der Mikrophonebene) nach Abb. 10. Die nahezu ideal geformte Achter-

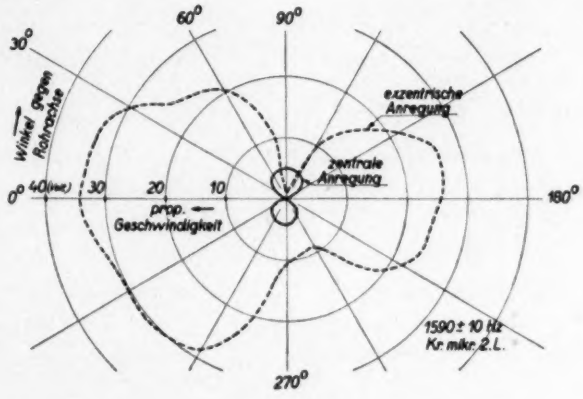


Abb. 11. Mikrophoncharakteristik eines Geschwindigkeitsmikrophons im Rohr bei 1590 Hz Tonfrequenz bei zentraler und exzentrischer Anregung

charakteristik mit dem Auftreten des Maximums, wenn die Mikrophonebene senkrecht auf der Rohrachse steht, zeigt das Vorhandensein ebener Wellen, die längs der Rohrachse fortschreiten, unter allen Anregungsbedingungen. Während etwas oberhalb der kritischen Grenzfrequenz (Abb. 11) bei der zentralen Rohranregung noch ebene Wellen bestehen, setzen bei exzentrischer Anregung Querschwingungen (Achse der Achtercharakteristik um 90° geschwenkt) mit sehr großer Geschwindigkeitsamplitude ein. (Die Spannungswerte der Abb. 10 bis 14 sind untereinander vergleichbar.) Abb. 12 zeigt einen Fall, wo bei zentraler Anregung die Geschwindigkeit in Achsrichtung sehr groß wird, dagegen bei exzentrischer Anregung Querschwingungen mit kleiner Geschwindigkeitsamplitude auftreten. Von besonderem Interesse ist Abb. 13. Hier zeigt sich, daß neben der Geschwindigkeitskomponente in Achsrichtung bei Zentralanregung und der Zusatzquerkomponente bei exzentrischer Anregung noch in beiden Fällen ein Wirbel vorhanden sein muß. Ein Geschwindigkeitsmikrophon mit

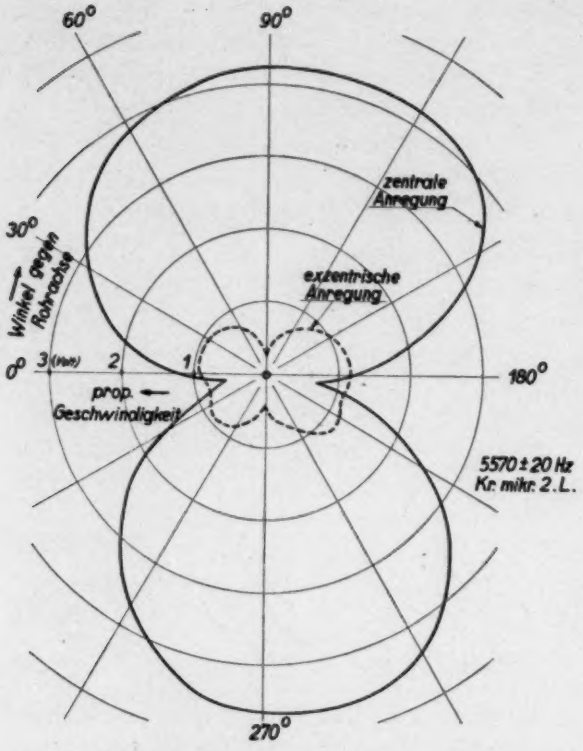


Abb. 12. Mikrophoncharakteristik eines Geschwindigkeitsmikrophons im Rohr bei 5570 Hz Tonfrequenz bei zentraler und exzentrischer Anregung.

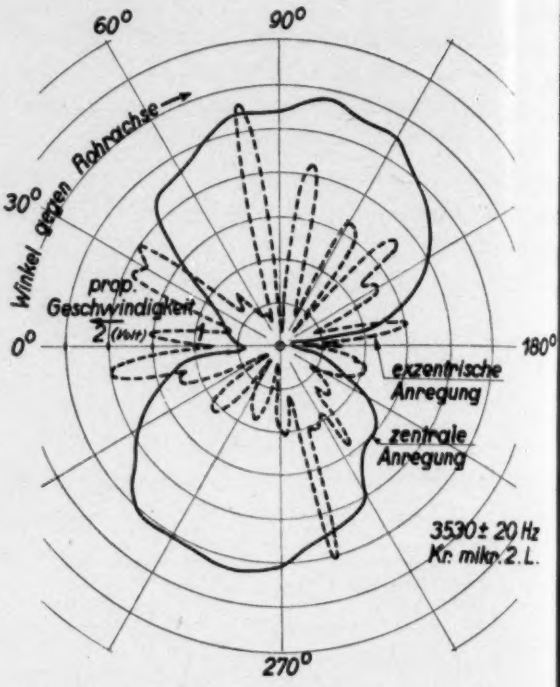


Abb. 14. Mikrophoncharakteristik eines Geschwindigkeitsmikrophons im Rohr bei 3530 Hz Tonfrequenz bei zentraler und exzentrischer Anregung

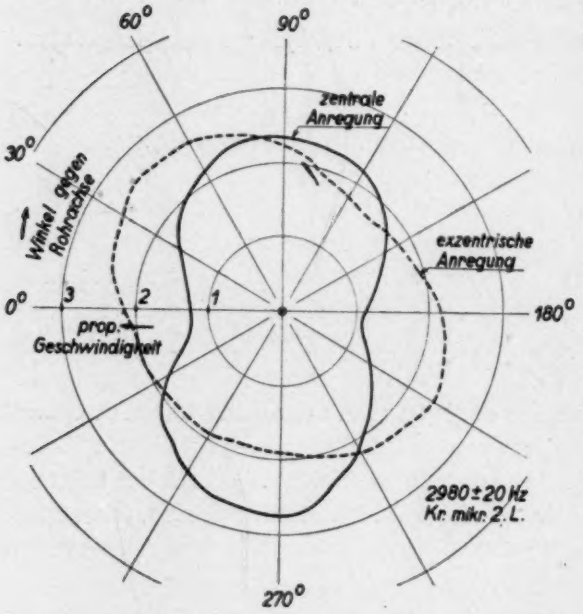


Abb. 13. Mikrophoncharakteristik eines Geschwindigkeitsmikrophons im Rohr bei 2980 Hz Tonfrequenz bei zentraler und exzentrischer Anregung

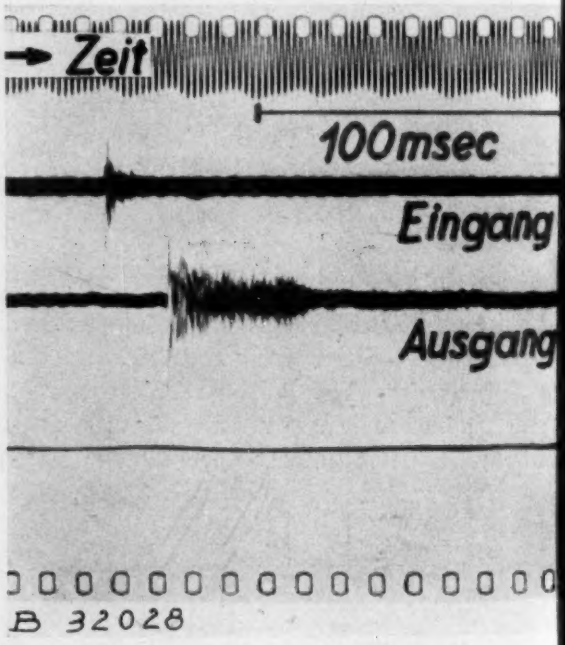


Abb. 15. Schallimpuls 20 cm vom Anfang und am Ende (685 cm vom Anfang) des Rohres registriert

Achtercharakteristik kann nämlich eine Kreischarakteristik nur in einem stabilen Drehfeld zeigen. Auf die Möglichkeit des Auftretens von Schallwirbeln in KUNDTschen Rohren hat bereits RAYLEIGH[6]) hingewiesen; experimentell nachgewiesen wurden sie auch an Trichtern[7]).

Einen labilen Schwingungszustand im Rohr zeigt Abb. 14. Bei exzentrischer Anregung ist hier, im wesentlichen wohl durch das Meßmikrophon und seine Zuführung, die Kreissymmetrie gestört, und die Schwingungsrichtung im Rohr klappt in Abhängigkeit von der Mikrophonstellung dauernd um. Immerhin war auch hier der Kurvenverlauf bis auf etwa 10% genau bei mehrmaliger Wiederholung reproduzierbar.

Von Interesse ist auch die Entstellung von Impulsen beim Durchlaufen durch das Rohr. Daher wurde am Rohranfang ein Schlagwerk (Metronom) angebracht, der Schalldruck in 20 cm und in 685 cm hinter dem Anfang oszillographiert. Das Ergebnis zeigt Abb. 15. Der anfangs in wenigen Millisekunden ablaufende Vorgang erscheint am Ende schon beträchtlich in die Länge gezogen.

Die Übertragung von Musik und Sprache über Lautsprecher am Rohranfang und Mikro-

[6]) LORD RAYLEIGH, Philos. Trans. Roy. Soc. London 1 (1883), S. 175.

[7]) P. KOTOWSKI, Elektr.Nachr.-Techn. 9 (1932), S. 404.

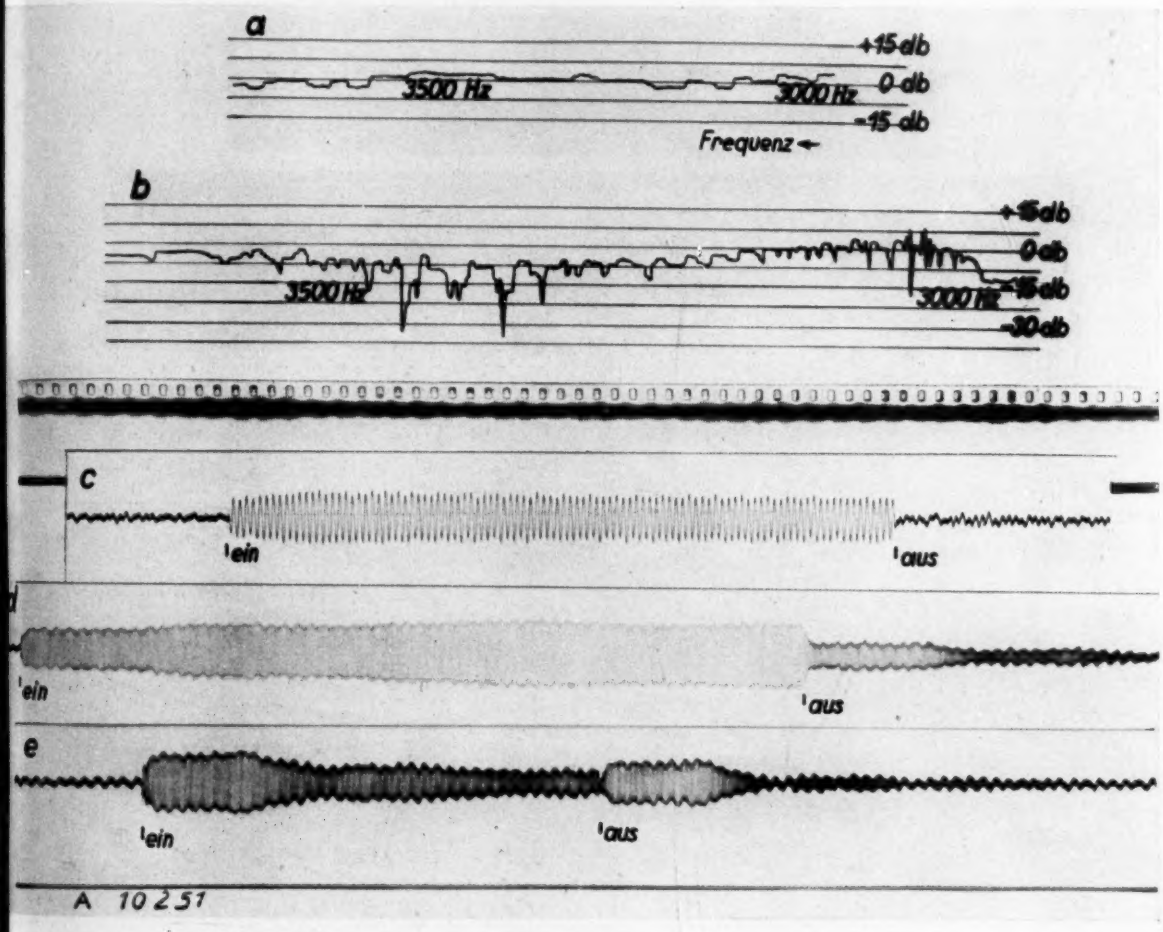


Abb. 16. Rohrbeschallung mit ebenen, parallel zur Rohrachse fortschreitenden Wellen:
a) Schalldruckregistrierung außerhalb des Rohres; b) Schalldruckregistrierung am Rohrende; c) geschalteter Sinuston im regulären Frequenzbereich am Rohrende; d) geschalteter Sinuston im irregulären Frequenzbereich am Rohrende (Schalldruckmaximum); e) geschalteter Sinuston im irregulären Frequenzbereich am Rohrende (Schalldruckmaximum)

phon am Rohrende ergab, als Folge der gestörten Schallübertragung bei hohen Frequenzen mit ihren großen Laufzeitdifferenzen, ein störendes Schwirren und Zirpen beim Auftreten höherer Töne, besonders auch bei dem Toneinsetzen. Dasselbe war auch bei unmittelbarer Rohrbeschallung durch einen Sprecher am offenen Rohranfang zu bemerken, wurde aber weniger störend, wenn durch größere Entfernung des Sprechers vom Rohranfang die dort eintreffenden Wellen nahezu eben und unter kleinem Winkel zur Rohrachse auffielen.

Es wurde daher untersucht, ob nicht durch Beschallung mit praktisch ebenen, parallel zur Rohrachse fortschreitenden Wellen die Übertragungsstörungen bei hohen Frequenzen vermieden oder doch auf erträgliche Werte zurückgeführt werden könnten. Zu diesem Zweck wurde das Rohr mit den Meßmikrophonen und Meßgeräten auf freiem ebenem Versuchsfeld aufgestellt und die Betönung durch einen genau auf Rohrachse ausgerichteten Lautsprecher in großer Entfernung (> 10 m) vom Rohranfang vorgenommen. Es zeigte sich, daß die Störungen im wesentlichen auf das Frequenzgebiet zwischen 3000 und etwa 3600 Hz beschränkt waren, dort aber in fast unveränderter Größe auftraten. Es wird also hier selbst eine vollkommen symmetrische ebene Welle im Rohr allmählich infolge unvermeidlicher kleiner Störungen der Symmetrie im Rohr umklappen und zu Querschwingungen führen. Abb. 16a zeigt den Schalldruckverlauf bei steigender Frequenz im ungestörten Schallfeld (außerhalb des Rohres), 16b den Verlauf am Rohrende. Plötzlich geschaltete Sinustöne niedriger Frequenz kommen auch am Rohrende nahezu unverzerrt an (16c) und sind vom hier nicht abgebildeten Oszillogramm am Anfang kaum zu unterscheiden, während im Störungsgebiet lange Ausgleichserscheinungen auftreten, die verschieden ausfallen, je nachdem die Töne auf Resonanzspitzen (16d) oder in Senken (16e) der Rohrübertragungskurve fallen. Die Störungen können also durch die Art der Rohranregung niemals vermieden werden.

Zusammenfassung

Die Untersuchungen zeigen, daß für jede Rohrweite eine zugehörige kritische Grenzfrequenz besteht, oberhalb der die Schallübertragung durch extrem starke lineare Verzerrungen (Amplitudenschwankungen) und lange Laufzeiten praktisch verhindert wird. Gleichzeitig ergeben sich auch für tiefere Frequenzen starke nichtlineare Verzerrungen, da die vorhandenen Obertöne in Gebiete hohen Rohrstrahlungswiderstandes fallen können, wobei sich die Schalldruckverhältnisse im Rohr zuungunsten der Grundtöne verschieben. Werden die Rohrweiten so verkleinert, daß die kritische Grenzfrequenz über der höchsten vorkommenden Übertragungsfrequenz liegt, so ist durch die nunmehr infolge der Querschnittverringerung gesteigerte Dämpfung im Rohr eine Übertragung undurchführbar.

(Eingegangen am 16. 6. 1938.)

Untersuchungen zur Schaffung geeigneter Kraftfahrzeug- und Flugzeugschwingungsmesser

Von F. I. Meister

Mitteilung aus der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt zu Berlin-Charlottenburg

(Mit 17 Textabbildungen)

In der vorliegenden Arbeit wird eine kurze Übersicht über die geeigneten Meßverfahren gegeben, wobei besonderer Wert auf die elektrischen Verfahren gelegt wird. Hierbei erscheint die Messung von Schwingungen durch Geräte mit amplitudenmodulierter Wechselspannung (Trägerfrequenz) infolge der guten Verstärkungsmöglichkeit der tiefen Frequenzen besonders aussichtsreich.

Ein solches Meßgerät ist in der Arbeit beschrieben. Es kann für Schwingweg- und Beschleunigungsmessungen, wie auch für die Messung langsam verlaufender Dehnungen und Drücke benutzt werden. Zur Messung von Beschleunigungen wurden kapazitive Geber entwickelt, die besonders klein nach Art der Kondensatormikrophone ausgeführt werden können und die mit dem Meßgerät durch Spezialkabel verbunden sind. Untersuchungen auf einem Schwingtisch und im Kraftwagen zeigen, daß das Gerät den meßtechnischen Aufgaben gewachsen ist.

Die Schwingungsmeßtechnik hat durch die neuere Entwicklung des Kraftfahrzeug- und Flugwesens mannigfache Anregungen zur Veränderung und Vervollkommnung ihrer Meßgeräte erhalten. — Eine ganze Reihe vorzüglicher älterer Schwingungsmesser waren für die Benutzung in Fahr- und Flugzeugen zu unhandlich oder aber den jeweiligen Meßbedingungen nicht mehr gewachsen. Oftmals war die äußere Form und die Größe des Instruments ein Hindernis für die Anwendung.

Ein neuzeitlicher Schwingungsmesser für das Fahrzeug- und Flugwesen muß folgende Bedingungen erfüllen:

1. Das Gerät soll bei genügender Meßgenauigkeit einfach zu bedienen sein.
2. Es soll möglichst geringe Masse haben, um es an schwingenden Teilen ohne Störung des Schwingungsvorganges befestigen zu können, d. h. Aufnahme- und Registriergerät sind zu trennen.
3. Das Gerät muß erlauben, Schwingungen an mehreren Stellen gleichzeitig aufzunehmen und sie auf einem Papier- oder Zellulosefilm nebeneinander aufzuzeichnen.
4. Im gesamten zu messenden Frequenzbereich soll nur eine physikalische Meßgröße, z. B. die Schnelle oder die Beschleunigung oder der Schwingweg aufgezeichnet werden, damit die Auswertung des Schwingungsbildes keine Umrechnungen erfordert.

Schon an einigen älteren Geräten zeigten sich Ansätze, die eine Entwicklung der Schwingungsmesser nach obigen Gesichtspunkten andeuteten. Zu diesen Geräten gehörten u. a. die Kohlebeschleunigungsmesser in der Bauart Waas sowie der Piezoquarzbeschleunigungsmesser von Armbronn. Die übrigen älteren Meßinstrumente waren den seismischen Geräten nachgebildet, d. h. sie besaßen eine mehr oder weniger große träge Masse, deren Bewegung mechanisch oder elektrisch aufgeschrieben wurde. Im folgenden soll nur von Geräten mit geringer träger Masse gesprochen werden, denn die obigen Bedingungen lassen sich nur unter Verwendung kleiner Massen erfüllen. Hierdurch ist man zwangsläufig auf

die Verwendung geeigneter Verstärker angewiesen[1]).

Die Frage der Verstärkung bei tiefen Frequenzen

1. Die unmittelbare Verstärkung

Die Verstärkung sehr tiefer Frequenzen, wie sie z. B. in Kraftfahrzeugen auf welligen Straßen oft auftreten, läßt sich mit den gewöhnlichen Verstärkerkopplungsgliedern, wie Kondensatoren und Übertrager nur unvollkommen durchführen. Die Wahl allzu großer Gitterkopplungskondensatoren führt je nach Geberwiderstand leicht zu Gitteraufladungserscheinungen und gibt für tiefere Frequenzen als 3 Hz keine ideale frequenz- und phasenunabhängige Verstärkung. Derartige Verstärker wird man daher nur dort anwenden, wo auf die Wiedergabe tiefer Frequenzen kein besonderer Wert gelegt zu werden braucht. Als Beispiel mag hier der Verstärker des elektrodynamischen Schwingungsmessers von E. MEYER und BÖHM[2]) (s. Abb. 1) dienen.

Einen ähnlichen Verstärker benutzen auch DRAPER, BENTLEY und WILLIS[3]). Beide Verstärker haben als besonderen Zusatz ein integrierendes Filter, um mit elektrodynamischen Gebern Schwingwegmessungen durchführen zu können.

Ein anderer, begrenzt gangbarer Weg führt zur Verwendung von besonderen Übertragern mit Kernen sehr hoher Permeabilität. Bereits mit kleinen Kernen aus Permalloy C ($\mu_0 = 10000$)[4]) kann die Spannungsverstärkung bei tiefen Frequenzen um das Mehrfache gegenüber normalen Übertragern gehoben werden. Abb. 2 zeigt die Frequenzkurven eines Permalloy-C-Übertragers mit verhältnismäßig kleinem Kern (Heraeus, Type C 156) und einem gewöhnlichen Niederfrequenzübertrager bei gleichen Anpassungsverhältnissen. Wählt man den Permalloykern drei- bis viermal so groß, so läßt sich die Frequenzkurve noch wesentlich verbessern. Für die Anodenseiten eines Verstärkers mit solchen Übertragern muß man aus Gründen der Verringerung der Gleichstrommagnetisierung zu Gegentaktübertragern

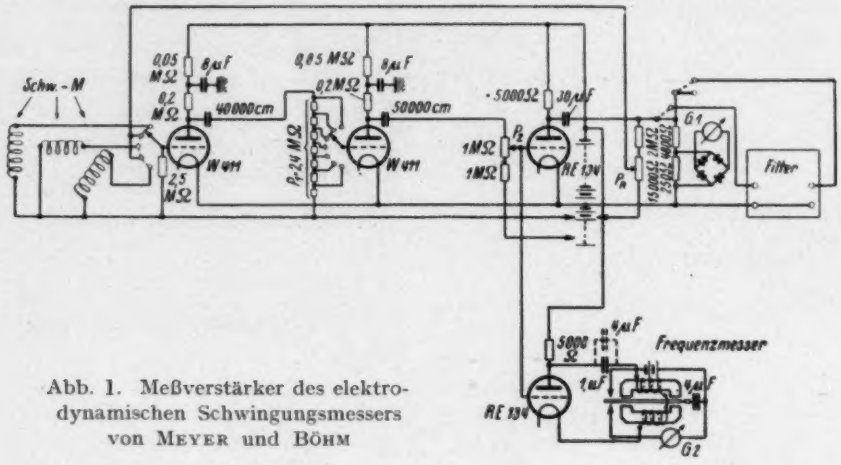


Abb. 1. Meßverstärker des elektrodynamischen Schwingungsmessers von MEYER und BÖHM

[1]) Von Stufenbeschleunigungsmessern, die als höchstwertanzeigende Instrumente für gröbere Messungen oftmals angewandt werden, soll hier abgesehen werden.

[2]) MEYER u. BÖHM, Ein elektrodynamischer Schwingungsmesser . . . Elekt. Nachr.-Techn. 12 (1935), S. 404—414.

[3]) C. S. DRAPER, G. D. BENTLEY and H. H. WILLIS, Vibration Measurement in flight (Massachusetts Inst. of Techn. Cambridge). J. Soc. automot. Engrs. 41 (1937), S. 428—436.

[4]) E. GUMLICH, W. STEINHAUS und B. SCHARNOW, Über Materialien mit hoher Anfangspermeabilität (Mitt. a. d. Phys.-Techn. Reichsanstalt). Elektr. Nachr.-Techn. 5 (1928), S. 83 und 7 (1930), S. 231; ferner ATM (Firmenblatt Z. 913—2).

greifen. Permalloy C hat gegenüber Permalloy A bzw. B den Vorteil geringerer Empfindlichkeit gegen Stoßbeanspruchungen. Trotzdem empfiehlt es sich, derartige Übertrager weich gefedert einzubauen.

Gleichstromverstärkung und damit Verstärkung tiefer Frequenzen wird häufig durch kompensierte Gitter-Anodenkreise erreicht. Zum Betrieb derartiger Verstärker sind belastungsunabhängige Anodenspannungen erforderlich. Die Verstärkung bereitet dann keine besondere Schwierigkeit. In der Abb. 3 ist ein solches Gerät für dreifach parallelbetriebene Zweistufenverstärkung dargestellt. An den Verstärker kann unmittelbar ein Dreischleifenoszillograph als Anzeigeinstrument angeschlossen werden. Die zweite Stufe dient bei diesen Verstärkern nur als Spannungs-Stromumformer. Die Verstärkung ist für Eingangsspannungen unter 150 mV linear und für Frequenzen von 0 bis über 10000 Hz konstant. Wählt man Röhren mit geringem Anodenstromverbrauch, so kann man den Verstärker mit einem Batteriesatz betreiben, der zum Auswechseln in das Gerät eingebaut wird. Seine Spannungskonstanz reicht vollständig aus. Im dargestellten Verstärker sind die Batterien infolge guter Erholungsmöglichkeit über ein Jahr in Betrieb.

In der Abb. 4 ist die vollständige Ausrüstung für Beschleunigungsmessungen mit Piezoquarzsystemen Armbronnscher Bauart gezeigt. Das Gerät wurde für Dreikomponentenmessung mit einem Siemens-Dreischleifenkofferoszillographen als Schreibgerät versehen. An Stelle der Piezosysteme können auch andere elektrisch arbeitende Schwingungsmesser, z. B. induktive oder auch Kohlegeber an den Verstärker angeschlossen werden.

Für Beschleunigungsmessungen an Kraftwagenteilen und -motoren sind die Piezokörper mit Umformerröhre zu groß. Auch sind sie gegen die starken Beanspruchungen bei Kraftwagenschwingungen und Motorvibrationen in der älteren Bauart zu leicht Beschädigungen ausgesetzt. Trennt man die Umformerröhre vom Quarzsatz, wie dies bei Piezodruckmessern üblich ist, so wird für die tiefen Frequenzen und bei kleinen Massenkräften infolge der Ableitverluste der Gitterleitung der Umformerröhre die lineare Beschleunigungsanzeige in diesem Frequenzbereich geändert, es sei denn, daß man größere Massenkräfte, also größere Relativmasse wählt. Dies widerspricht jedoch den eingangs gestellten Bedingungen[5]). Etwas kleiner als die Piezoquarzkörper und bequemer in der Bedienung sind Kohlemeßkörper. Besonders wenn es sich um die Messung größerer Beschleunigung handelt. Abb. 5 zeigt 2 Meßkörper der Askania-Werke, die von uns zu Vergleichsmessungen in Kraftwagen mehrfach benutzt worden sind. Hinsichtlich des einfachen Aufbaues und der bequemen Handhabung ist der Kohlebeschleunigungsmesser für einen rauhen Arbeitsbetrieb, wie er durch Messungen an Kraftwagen gegeben ist, geeignet. Seine Meßgenauigkeit

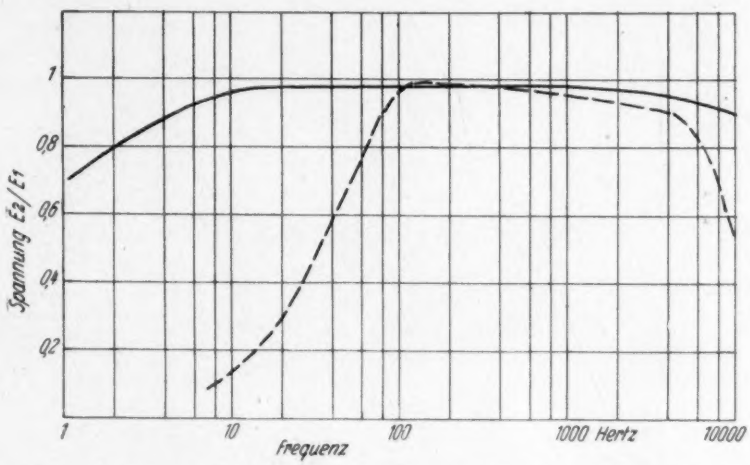


Abb. 2. Frequenzkurve eines Übertragers mit kleinem Permalloy-C-Kern (ausgezogene Kurve) und eines normalen Niederfrequenzübertragers für gleiche Anpassung

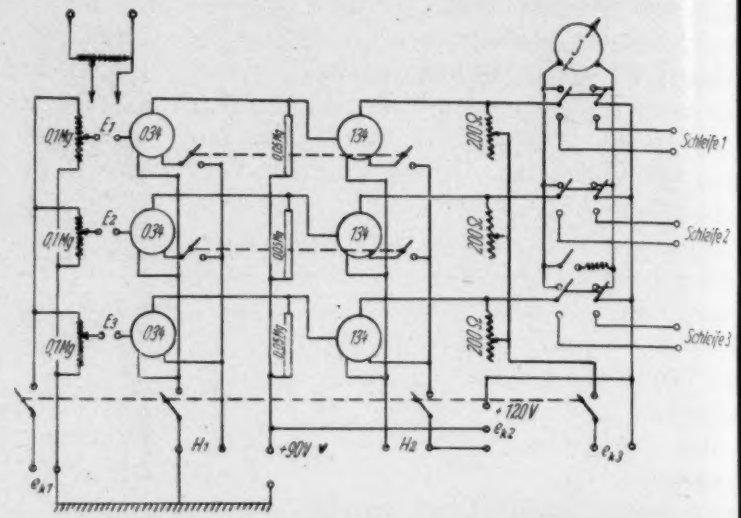
[5]) Durch besonders kleine Umformerröhren mit hoher Erschütterungsfestigkeit und guter Gitterisolation ließe sich jedoch zweifellos eine Verkleinerung der bisherigen Piezomeßkörper erreichen.

dürfte zweifellos noch erhöht werden können[6]).

In jüngster Zeit sind vielfach elektrodynamische und magneto-elastische Systeme als Geber angewandt worden[7]), die ersteren als Schwingungsgeschwindigkeitsmesser, die letzteren als Spannungs- und Beschleunigungsmesser. Die Schwingungsgeschwindigkeitsmesser, die als Spannungserzeuger mit festem permanenten Magneten und beweglichem Joch oder beweglicher Schwingspule ausgerüstet sind, besitzen für die Geschwindigkeitsmessung nach den tiefen Frequenzen je nach Lage der Resonanz eine Begrenzung der linearen Anzeige. Besonders tief abgestimmte Systeme sind notwendigerweise schwer und unhandlich. Für magneto-elastische Systeme, die meist mit einer Trägerfrequenz arbeiten, ist der Frequenzumfang des linearen Übertragungsbereiches nicht in dem Maße von der Gebergröße abhängig. Bei kleinen Gebern muß entsprechend größere Verstärkung angewandt werden.

2. Mittelbare Verstärkung mit Hilfe einer Trägerfrequenz

In letzter Zeit gewinnt das Trägerfrequenzverfahren infolge der bequemen Verstärkungsmöglichkeit der tiefen Frequenzen erhöhte Bedeutung für die Schwingungsmessung. Bei diesem Verfahren wird eine Hilfsspannung benutzt, deren Frequenz ein Vielfaches der zu verstärkenden Meßfrequenzen beträgt. Durch den Meßkörper (Geber) wird diese Hilfsspannung moduliert. Die Trägerspannung kann dann mit ihrer Modulation in einem gewöhnlichen Verstärker verstärkt werden. Als Geber dient ein Wechselstromwiderstand, den man als Dehnungsmesser oder Druckmesser oder für Relativbewegungen als Beschleunigungsmesser und Schwingwegsmesser einrichten kann.



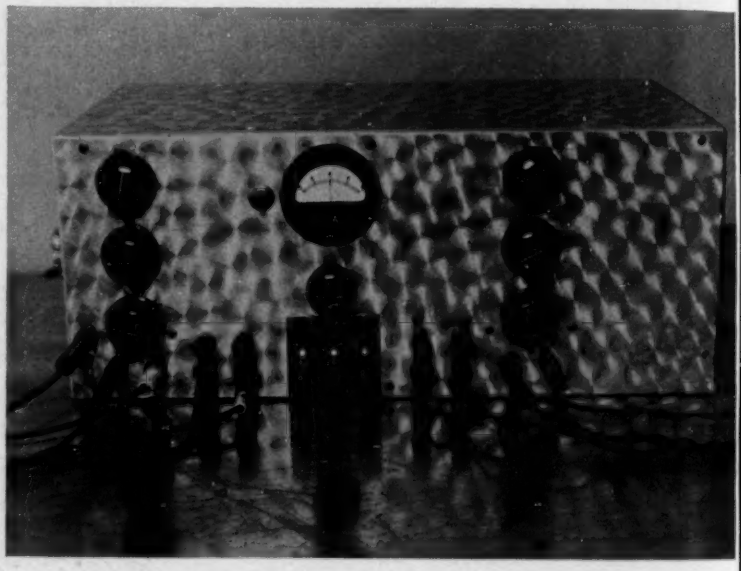


Abb. 3. Kompensierter Batterieverstärker für dreifach Parallelbetrieb

Das erste praktisch brauchbare Gerät in der Art war der Rieggersche Kapazitäts-

[6]) Über die Ergebnisse von Untersuchungen an Kohlebeschleunigungsmessern erscheint vom Verfasser in Kürze ein Bericht.

[7]) W. Janovsky, Aufzeichnung schneller mechanischer Vorgänge durch magneto-elastische Meßkörper. ATM V (1935), 132—8.

messer[8]) in Hochfrequenzschaltung. RIEGGER wandte zur Messung kleiner Kapazitäten eine Frequenzmodulation in einem Hochfrequenzschwingungskreis an, bei der die Änderung der Kapazität des Meßkondensators eine Verstimmung des Kreises bewirkte. Der geradlinige Teil des Anstieges der Resonanzkurve des sehr wenig gedämpften Schwingungskreises stand dann als Aussteuerbereich zur Verfügung. Die Methode zeichnete sich durch besondere Empfindlichkeit aus. Doch ist es im allgemeinen schwierig, den Geberkondensator vom Schwingkreis zu trennen. Vielmehr baut man ebenso wie beim Kondensatormikrophon das erste Verstärkerrohr und seinen Gitterkreis mit dem Geberkondensator als eine Einheit zusammen.

Das neuere Verfahren mit amplitudenmodulierter Trägerspannung, das durch den Dehnungsmesser von REISCH[9]) bekannt wurde, gestattet bei Anwendung kapazitätskonstanter Kabel, den Geber beliebig weit vom Hilfsgerät zu trennen. Der Geber kann dabei recht klein gewählt werden. Für kapazitive Geber liegt eine Beschränkung für die Größe des Kondensators lediglich in der Bedingung, daß das Verhältnis von Geberkapazität zu Kabelkapazität nicht zu klein werden soll. Es gibt heute serienmäßig hergestellte Kabel, die bei weniger als 25 cm/m Eigenkapazität, auch bei starken Kabelbewegungen, praktisch keine Kapazitätsänderungen zeigen. Durch die Schaffung derartiger Zuleitungskabel ist den Trägerfrequenzverfahren der Weg in die Praxis freigemacht worden.

Im Laboratorium für Erschütterungsmessungen der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt wurde im letzten Jahre ein solcher Trägerfrequenzschwingungsmesser entwickelt. Für die Vorversuche genügte zunächst ein Einkomponentengerät. Ein Meßgerät für die gleichzeitige Aufzeichnung dreier Raumkomponenten ist im Bau.

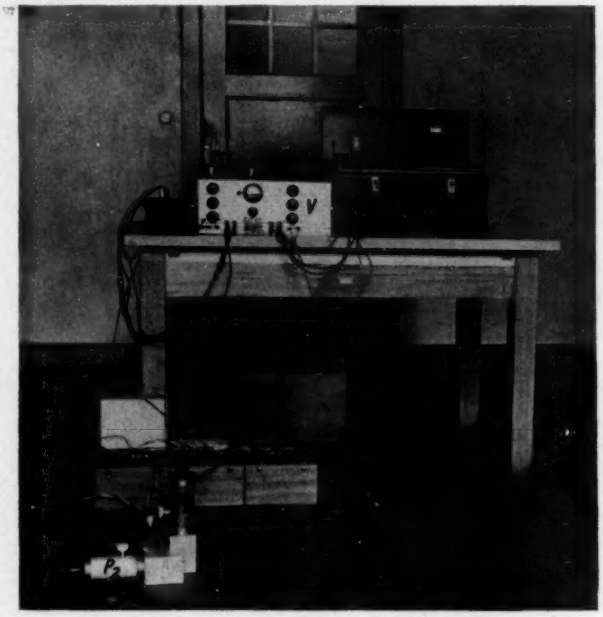


Abb. 4. Dreikomponenten-Piezoquarz-Beschleunigungsmesser. P_1, P_2, P_3 Piezo-Meßkörper ARMBRONNscher Bauart, V Dreifach parallelbetriebener Gleichstromverstärker, O Dreischleifen-Kofferoszillograph (Schleifeneigenschwingung 2000 Hz)

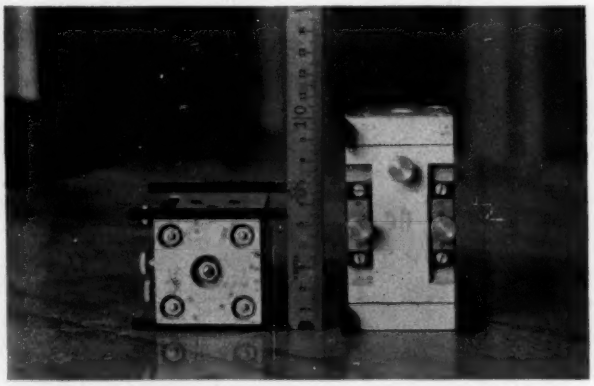


Abb. 5. Kohle-Beschleunigungsmesser der Askaniawerke

Der Kondensatorgeber

Als Meßkörper für Beschleunigungsmessungen in Kraftfahrzeugen konnte nur ein robuster Geber verwandt werden, der starken Beanspruchungen gewachsen war und trotz-

[8]) H. RIEGGER, Über klanggetreue Schallaufnahmen, Verstärkung und Wiedergabe. Z. f. techn. Physik 5 (1924), S. 577. F. TRENDELENBURG, Objektive Klangaufzeichnung mittels des Kondensatormikrophons. Wiss. Veröff. Siemens-Konz. III 2 (1924), S. 43ff.; IV 1 (1925), S. 1ff. Z. techn. Physik 5 (1924), S. 236ff.

[9]) REISCH, Über eine elektrische Einrichtung zur Messung kleiner Verschiebungen. Z. Hochfrequenztechn. 38 (1931), S. 101.

dem eine genügende Empfindlichkeit und Meßgenauigkeit besaß. Es wurde als Geber eine Kondensatormeßdose mit Kolbenmembran benutzt. Die Kolbenmembran besteht, wie man aus Abb. 6 ersieht, aus 2 Ringmembranen, zwischen denen die Relativmasse eingespannt ist. Die Relativmasse bildet die bewegliche Elektrode; sie ist über die Membranen und das Gehäuse geerdet. Die feste Elektrode des Kondensators ist isoliert in das Gehäuse eingebettet. Die Zuführung der Wechselspannung geschieht über die Kabelseele des einadrigen gepanzerten Kabels.

Je nach der Steifigkeit der benutzten Membranen und dem Gewicht der Relativmasse vermag man die Eigenfrequenz des Meßkörpers in weiten Grenzen zu variieren. In den Raum zwischen den Membranen einerseits und dem Gehäuse und der Relativmasse andererseits kann eine Dämpfungsflüssigkeit etwa in Form eines zähen Getriebefettes eingeführt werden, um die Ausschläge in der Nähe der Eigenfrequenz herabzusetzen, wenn man es nicht vorzieht, die Frequenzkurve oberhalb einer gewissen Grenzfrequenz durch elektrische Filter im Ausgang des angeschlossenen Gleichrichters abzuschneiden. Es ist möglich, den Meßkörper auf die Größe eines normalen Kondensatormikrophons zu bringen. Das Gewicht des Gebers läßt sich durch Wahl geeigneter Werkstoffe recht klein halten. Die Befestigung des geerdeten Kabelmantels am Geberdeckel geschieht durch eine Überwurfmutter, den Kontakt zwischen der Seele des Kabels und der isolierten Elektrode des Kondensators vermittelt ein Steckstift im Innern der Überwurfmutter. Der Geberdeckel ist besonders steif und hat zu der isolierten Elektrode einen genügenden Abstand, so daß Kräfte, die über das Kabel auf den Geberdeckel wirken, praktisch vernachlässigbare Kapazitätsänderungen im Geber hervorrufen. Der Abstand der Meßelektroden voneinander muß sehr klein ge-

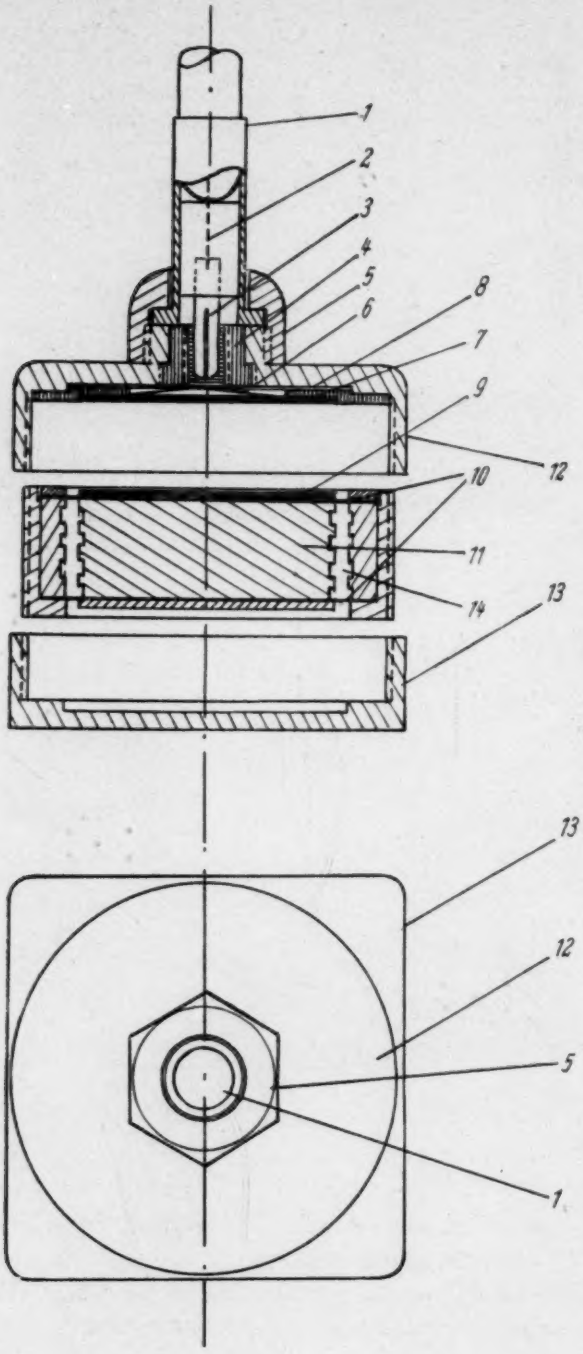


Abb. 6. Kleiner kapazitiver Geber als Beschleunigungsmesser

In einem Gehäuse aus dem Bodenstück (13) und dem Oberteil (12) ist ein Ringkörper, der die Membranen (10) mit der trägen Masse (11) enthält, eingeschraubt. Durch den aufgepreßten Isolierring (8) wird eine Elektrode (7) in festem Abstande über der Massenelektrode (9) gehalten. Diese Elektrode ist durch eine Litze (6) mit der isolierten Hülse (5) verbunden, in die die Kabelseele (2) durch einen Steckstift (3) eingeführt wird. Das Gehäuse des Meßkörpers ist durch die Überwurfmutter (4) mit dem geerdeten Kabelmantel (1) fest verbunden. Der steife Deckel des Oberteils überträgt auf die isolierte Elektrode keine Biegekräfte, da beide durch einen Luftraum getrennt sind

halten werden, da die zu messenden Abstandsänderungen infolge der kleinen Massenkräfte bei einer hohen Eigenfrequenz in der Größenordnung von einigen μ sind. Damit wird der Aufbau des Gebers zu einer feinmechanischen Aufgabe, die dem Bau von Kondensatormikrophonen verwandt ist.

In der Abb. 7 sind 2 Formen von Geberkondensatoren dargestellt; der größere diente als Probeausführung für die Vorversuche und besaß je nach der Einspannung und Steife der benutzten Bronzemembranen eine niedrige Eigenfrequenz der ungedämpften Schwingung von 50—120 Hz und damit eine relativ große Empfindlichkeit für tiefe Frequenzen. Die Eigenfrequenz des kleineren Meßkörpers war wesentlich höher (180—300 Hz). Die modulierte Wechselspannung dieses Gebers bedarf daher größerer Verstärkung, wenn man für beide Körper gleiche Anzeigen erhalten will. Beide Typen stellen noch keine endgültige Form für die Geber dar. Die zweckmäßige Größe und Gestalt wird man im Laufe der weiteren Versuche unter praktischen Erprobungen im Betrieb finden.

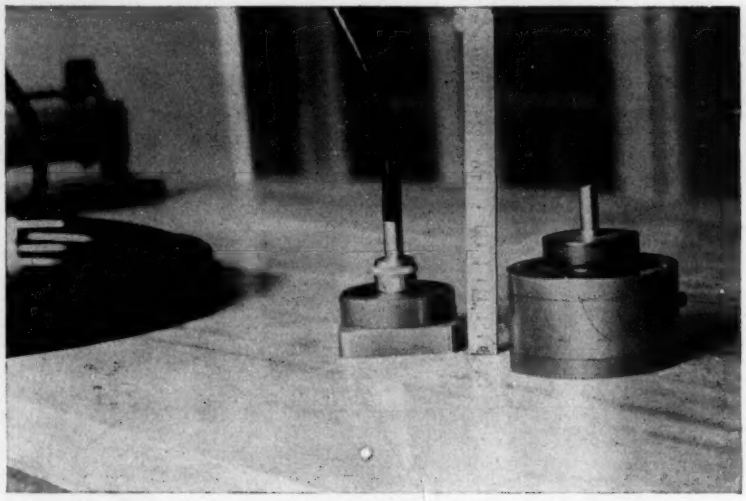


Abb. 7. Versuchsformen von kapazitiven Gebern für Beschleunigungsmessungen. Der kleinere Geber ist an ein 10 m langes kapazitätskonstantes Kabel angeschlossen

Das Trägerfrequenzgerät

Das Prinzip des Meßverfahrens wird in der schematischen Skizze der Abb. 8 verdeutlicht. Ein gewöhnlicher Einrohrsummer liefert eine Hilfsspannung mit genügend konstanter Amplitude und Frequenz, die auf eine Wechselstrombrücke gegeben wird. Für die Wechselstrombrücke ist gute Symmetrie der Brückenzweige gegen Erde eine Voraussetzung für das einwandfreie Arbeiten.

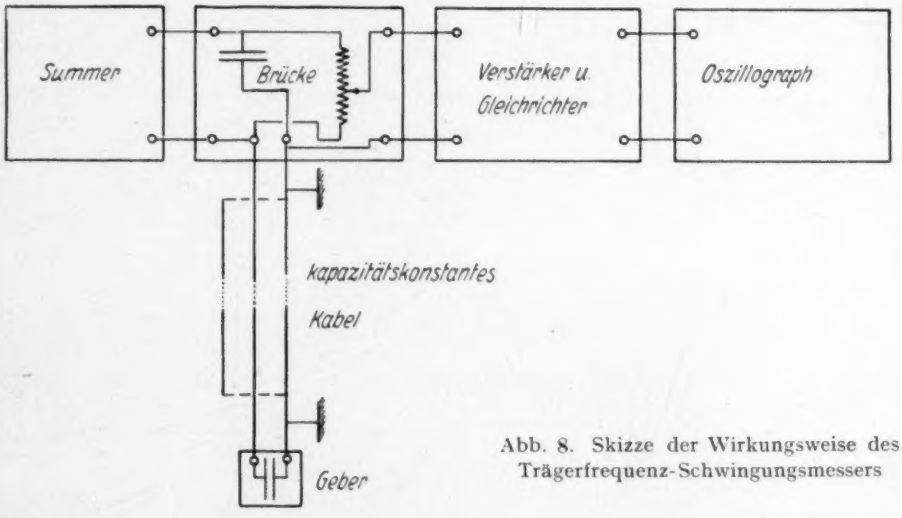


Abb. 8. Skizze der Wirkungsweise des Trägerfrequenz-Schwingungsmessers

Der Übertragungsbereich wird durch die Wahl der Größe der Trägerspannung im

Brückennullpunkt festgelegt, wobei man durch Ausmessen der Spannungsänderung beim Durchlaufen des Brückennullpunktes feststellt, ob das Minimum genügend scharf ist. Den Arbeitspunkt legt man etwas oberhalb des Minimums in den bereits geradlinigen Teil eines der Äste der Spannungskurve (s. Abb. 9).

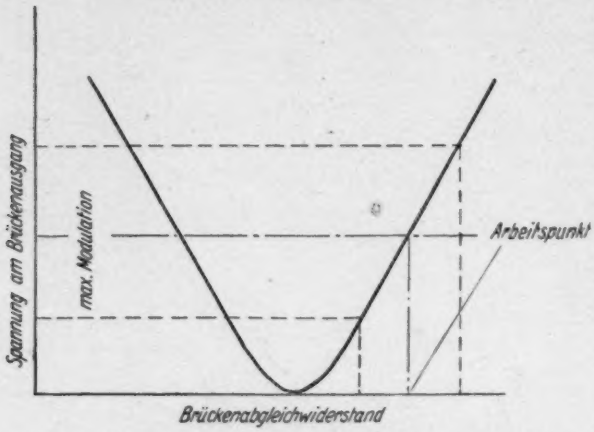


Abb. 9. Lage des Arbeitspunktes im Spannungsast der Wechselstrombrücke

Bei dem in der Brücke liegenden Geberkondensator ist der Abstand der Elektroden durch die maximal auftretende Relativbewegung vorgeschrieben. Man wählt den Abstand zweckmäßig etwa 10mal größer als die größte auftretende Relativbewegung. Die Verzerrung durch die nichtlineare Abhängigkeit der Widerstandsänderung vom Abstand der Elektroden bleibt dann vernachlässigbar klein[10]).

In den Abb. 10a und 10b ist in zwei Beispielen die Änderung der Trägerspannung an der Brücke bei Auftreten von Massenkräften im Meßkörper veranschaulicht. Das obere Beispiel bringt einen Beschleunigungsstoß, der gleichzeitig durch ein Kohlemeßgerät und durch den Kondensatorgeber aufgenommen wurde. Die umhüllende Kurve der Spannungs-

[10]) Von der Verwendung eines Differentialkondensators, der diese Nichtlinearität vermeidet, wurde sowohl aus konstruktiven Gründen als auch um keine zweiadrigen Kabel verwenden zu müssen, die nicht genügend kapazitätskonstant sind, abgesehen.

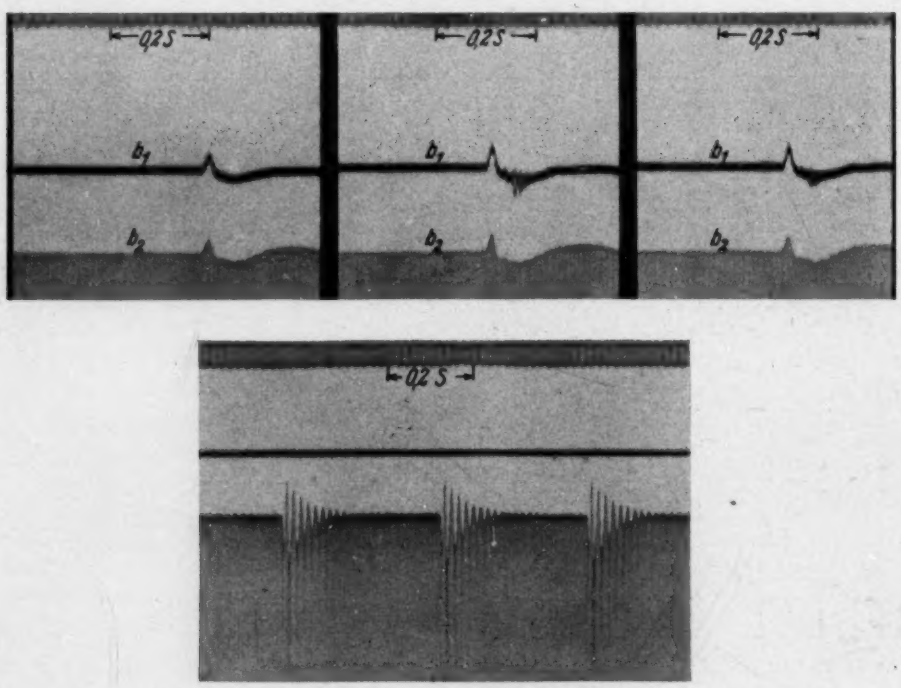


Abb. 10. a) Beschleunigungsstoß in unmittelbarer Aufzeichnung durch einen Kohlekörper (b_1) und als Modulationsbild bei der Änderung der Brückenspannung durch einen Geberkondensator (b_2). b) Abklingschwingung eines mäßig gedämpften Geberkondensators

änderung in der Brückendiagonale stimmt in ihrem Verlauf, wie das Bild zeigt, mit der unmittelbar gemessenen Beschleunigung genau überein.

Abb. 10b zeigt eine Abklingschwingung eines noch ungenügend gedämpften Kondensatorbeschleunigungsmessers. Man ersieht aus der Symmetrie der Schwingungsausschläge zum Rand der ungeänderten Trägerspannung, daß die Verzerrung durch die Nichtlinearität des Kondensators sehr gering ist. Neben der Amplitudenmodulation tritt hier eine leichte Frequenzmodulation auf, wie man an den Streifen im Trägerbild erkennen kann.

Der auf die Brücke folgende Verstärker reicht bei geeigneter Röhre in den meisten Fällen aus, um bereits einen Gleichrichter aussteuern zu können. Die negative Vorspannung des Gitters der Gleichrichterröhre wird so groß gewählt, daß für eine gegebene Trägerspannung im Brückennullzweig die Modulation für den ganzen Aussteuerbereich des Trägers in den geradlinigen Teil der Gleichrichterkennlinie fällt. Damit ist eine verzerrungsfreie Gleichrichtung gewährleistet. Im Ausgang des Gleichrichterrohres wird der Anodenstrom von den Resten des Trägers befreit und kompensiert. Summer, Brücke, Verstärker und Gleichrichter sind zusammen in einem Gehäuse untergebracht. Die Abb. 11 zeigt das fertige Versuchsgerät in der Einkomponentenausführung. Das Gerät benutzt als Schreiber einen kleinen Siemens-Kofferoszillographen. Wird die Transportgeschwindigkeit für den Papierfilm genügend klein gewählt, so kann der Beschleunigungsmesser als Pegelschreiber verwandt werden, was für statistische Untersuchungen häufig wünschenswert ist. Bei der im Bau befindlichen Dreikomponentenausführung wird zur besseren Ausnutzung der Verstärkereigenschaften des zweiten Rohres dieses durch einen Übertrager abgeschlossen. Eine Übersteuerung wird dadurch vermieden, daß der Träger im vorhergehenden Übertrager durch eine entsprechend gegenphasige Hilfsspannung ver-

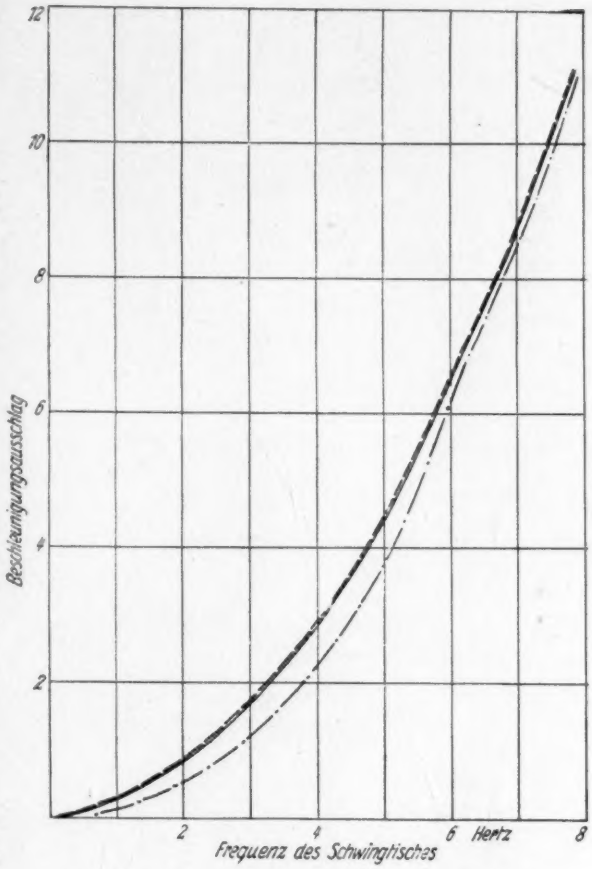


Abb. 12. Frequenzkurven dreier Beschleunigungsmesser bei langsamen Schwingungen

Die ausgezogene Linie gilt für einen Kondensatorgeber, die gestrichelte für ein Piezoquarz-System und die strichpunktierte Linie für einen Kohlebeschleunigungsmesser neuerer Bauart. Der Kohlebeschleunigungsmesser wird für langsame Bewegungen unempfindlicher

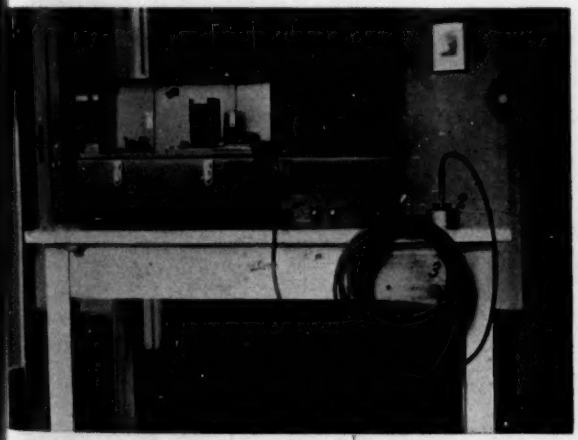


Abb. 11. Versuchsgerät für Beschleunigungsmessung mittels einer Trägerfrequenz

1 Trägerfrequenzgerät, 2 Geberkondensator, 3 kapazitätskonstantes Kabel, 4 Oszillograph

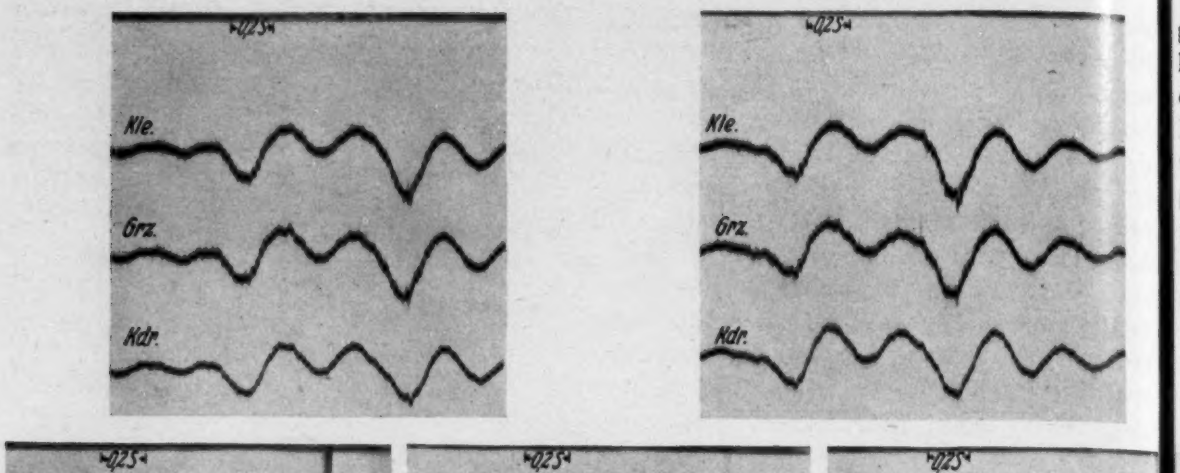


Abb. 13. Beschleunigungsstöße beim Überfahren einer künstlichen Unebenheit in der Fahrbahn mit drei verschiedenen Geräten am Chassis des Kraftwagens gemessen: Anzeigen *Kle.* mit Kohlebeschleunigungsmesser, *Qrz.* mit Piezoquarzsystem, *Kdr.* mit Kondensatorgeber

kleinert wird. Die Gleichrichtung geschieht durch Trockengleichrichter[11]). Das Dreikomponentengerät wird in einer abschließenden Arbeit, die Anwendungen des Gerätes in der Praxis der Kraftfahrzeugschwingungsmessung bringt, beschrieben werden.

Meßergebnisse bei der Erprobung der Aufzeichnungsgenauigkeit

Bevor das Gerät zu Messungen im praktischen Fahrbetrieb eingesetzt wurde, mußten zunächst Versuche zur Feststellung seiner Aufzeichnungsgenauigkeit durchgeführt werden. Daher wurden Vergleichsversuche mit zwei anderen Beschleunigungsmessern, einem Piezoquarz- und einem Kohlegerät, durchgeführt, wobei mit einem nicht so hoch abgestimmten Geberkondensator gearbeitet wurde. Als Vergleichsmaß diente zunächst die Frequenzkurve der drei Geräte im Bereich der tieffrequenten Fahrzeugschwingungen sowie der Ausklingvorgang der Eigenschwingung. Für diese Versuche wurde ein Schwingtisch[12]) benutzt, auf dem die Geräte bei nahezu sinusförmigen und bei Stoßbewegungen untersucht werden konnten. Auf dieses Versuchsgerät wird später noch eingegangen. Die Abb. 12 bringt die Frequenzkurven der drei Beschleunigungsmesser für gleiche Anzeigeempfindlichkeit. Die Kurven für das Quarzsystem und den Kondensator-

[11]) Einen ähnlichen Weg für die Ausgangskompensation benutzt der Siemens-Kraftverlaufsmesser. — R. Tamm und F. Bath, Der Kupferoxydolgleichrichter in der Meßtechnik. Veröff. Geb. Nachr.-Techn. 6 (1936), S. 51ff.

[12]) Der Schwingtisch wurde durch Herrn Dr. O. von Schmidt entwickelt. Für seine Mithilfe sei an dieser Stelle verbindlichst gedankt.

gebern zeigen praktisch keinerlei Abweichung von den geforderten Parabeln, während die Kurve für den Kohlekörper bei tiefen Frequenzen Abweichungen (wahrscheinlich infolge des nichtlinearen Verhaltens des Kohlewiderstandes bei langsamer Verformung) aufweist. Für den Kohlebeschleunigungsmesser macht sich diese Abweichung im Verlauf der Frequenzkurve bei den praktischen Beschleunigungsaufnahmen in Fahrzeugen nicht in dem Maße bemerkbar, wie man erwarten sollte. Als Beispiel bringt Abb. 13 einige Vergleichsmessungen eines Fahrstoßes in einem Kraftwagen. Die Anzeigen der drei benutzten Instrumente lassen denselben Beschleunigungsverlauf erkennen. Für die einzelnen Systeme wurde die Vergrößerung so gewählt, daß für alle drei Beschleunigungsmesser gleich große Ausschläge auftraten. Die Resonanzfrequenzen der drei Gebersysteme lagen bei diesem Versuch für den Quarzkörper bei 625 Hz, für den Kohlekörper bei 325 Hz und für den Kondensatorgeber bei 80 Hz. Der Abklingvorgang beim Erregen der Eigenschwingung der Beschleunigungsmesser wird in der Abb. 14 wiedergegeben. Während die Eigenschwingung des Kondensatorkörpers mit Dämpfungsflüssigkeit bereits nach drei Schwingungen abgeklungen ist, dauert dies beim Kohlekörper mehr als 20 Perioden und ebenso lange auch beim Abklingen der Schwingungen des Quarzsystems.

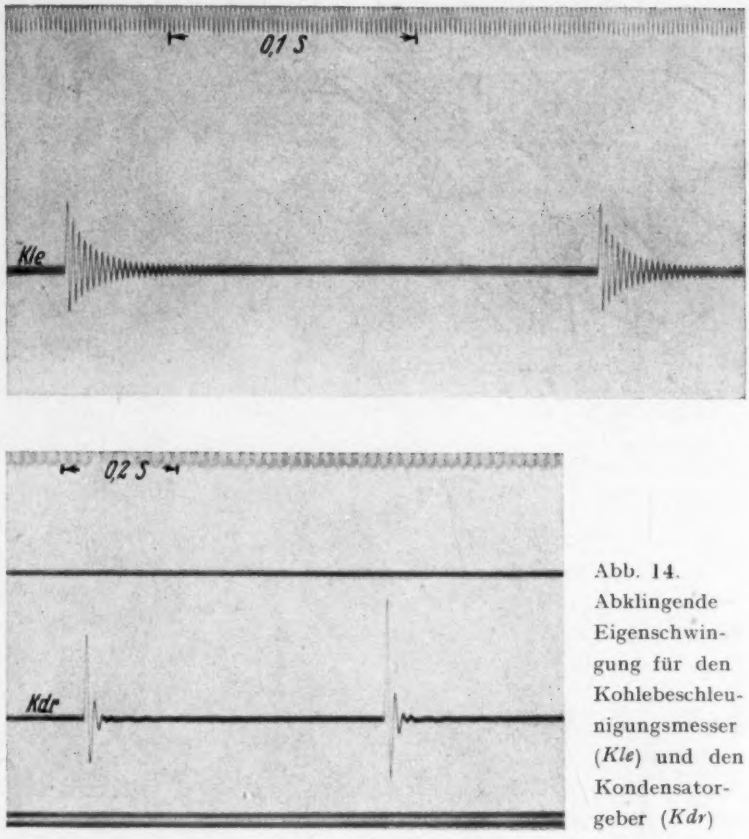


Abb. 14. Abklingende Eigenschwingung für den Kohlebeschleunigungsmesser (*Kle*) und den Kondensatorgeber (*Kdr*)

Die Aufzeichnung tieffrequenter Beschleunigungsstöße, wie sie beim Fahren auf unebenen Straßen in Kraftwagen auftreten, kann bereits mit relativ tief abgestimmten Meßsystemen ausgeführt werden. Die Grenze bis zu welcher Anstiegszeit einer Stoßfront man mit einem Meßsystem bestimmter Grenzfrequenz, die durch Eigenfrequenz und Dämpfung des Gebers gegeben ist, Stöße richtig aufzeichnet, wird angenähert durch die Beziehung zwischen Grenzfrequenz ω_0 und Einschwingzeit T

$$T = \frac{\pi}{\omega_0} \tag{1}$$

bestimmt [13]).

Die Grenzfrequenz ω_0 wird definiert nach

$$\omega_0 = \frac{1}{A(0)} \int_0^\infty A(\omega)\, d\omega, \tag{2}$$

wenn $A(\omega)$ den für das Meßsystem gültigen Übertragungsfaktor bedeutet. Angenähert hat bei der Grenzfrequenz die Frequenzkurve des Übertragungsfaktors ihre größte Steilheit.

Stöße mit schnellerem Anstieg als er durch die Einschwingzeit T gegeben ist, werden mit geringerer Steilheit in der Stoßfront aufgezeichnet; außerdem tritt bei zu geringer Dämp-

[13]) K. Küpfmüller, Beziehungen zwischen Frequenzcharakteristiken und Ausgleichsvorgängen in linearen Systemen. Elektr. Nachr.-Techn. 5 (1928), S. 18—32.

fung in diesem Falle eine Ausgleichsschwingung der angeregten Eigenfrequenz auf, die den Stoßvorgang weiter verzerrt. Aus der Gleichung (1) folgt, daß für eine Grenzfrequenz von 80 Hz Fahrstöße mit einer Anstiegsdauer der Stoßfront bis zu $^1/_{100}$ Sekunde hinsichtlich des aufgezeichneten Einschwingvorganges richtig wiedergegeben werden. Diese Einschwingzeit ist für die Messung von Fahrzeugbewegungen genügend kurz, anderseits verbleibt auch für sehr langsame Schwingungen ausreichende Empfindlichkeit im Geber.

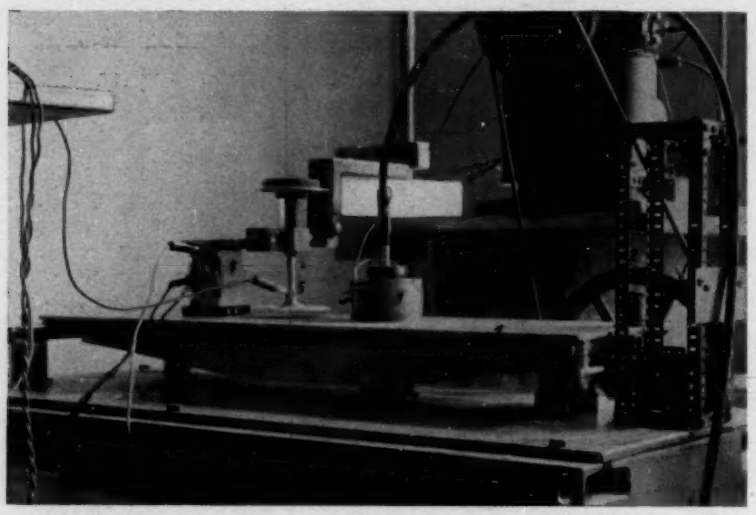


Abb. 15. Schwingtisch zur Erzeugung von sinusförmigen und stoßartigen Bewegungen nach O. von SCHMIDT

1 Schwingplatte an einer Feder (2) aufgehängt und durch Schwammgummipolster (7) gedämpft. 3 Kondensatorgeber, 4 Kohlebeschleunigungsmesser, 5 Schwingwegmesser. Für stationäre Schwingungen wird die Feder und das Schwammgummipolster entfernt und der Schwingtisch durch den Motor (6) über den Exzenter (8) bewegt

Um die Aufzeichnungsgenauigkeit des Einschwingvorganges bei einem Stoß zu prüfen, wurde der für die Messung der Frequenzkurve des Gerätes benutzte Schwingtisch einseitig an einer Feder aufgehängt, durch Schläge mit einem Gummihammer wurde dann diesem tief abgestimmten Resonanzsystem, das durch Schwammgummipolster etwas gedämpft war, ein Beschleunigungsstoß erteilt, dessen Verlauf durch einen Kohle- und Kondensatorgeber gleichzeitig gemessen wurde. Zur Aufzeichnung des Schwingweges diente ein zweites Trägerfrequenzgerät mit einem Kondensator als Verschiebungsmesser. Abb. 15 zeigt die Meßanordnung dazu.

Die aufgenommenen Stöße sind in Abb. 16 wiedergegeben. Die Beschleunigungsanzeige des Kohlekörpers ist mit b_1, die des Kondensatorgebers mit b_2, die des Verschiebungsmessers mit dem Buchstaben a gekennzeichnet. Beide Beschleunigungsmeßkörper ergeben denselben Anstiegwinkel des Stoßes. Mit zunehmender Beschleunigungsgröße macht sich bei dem weniger gedämpften Kohlekörper (vgl. Bild 16) mehr und mehr die Eigenschwingung bemerkbar und verzerrt schließlich das ganze Stoßbild.

Eine weitere Prüfung der Genauigkeit der Aufzeichnung kann durch zweimalige Differentation der gleichzeitig aufgenommenen Schwingwegkurve des Verschiebungsmessers durchgeführt werden. Da das umgekehrte Verfahren, die Integration der Beschleunigung, hier zweckmäßiger erscheint, wurde der Beschleunigungsstoß zweimal nach der Zeit integriert. Das Ergebnis ist in der Abb. 17 wiedergegeben. Der gewonnene Einschwingvorgang des Versuchstisches stimmt mit dem aufgezeichneten Schwingweg a hinsichtlich des Maximalausschlages, des zeitlichen Verlaufes und der Phasenlage genau überein.

Die zulässige kürzeste Zeit des Anstieges eines Einschwingvorganges betrug für den Beschleunigungsmesser etwa 0,006 sec; der Stoßanstieg erfolgte in 0,013 sec, er war also genügend langsam, um von dem Geber richtig aufgezeichnet werden zu können, was auch durch das Integrationsergebnis erwiesen wurde.

Schneller verlaufende Stöße wird man mit Gebern höherer Eigenfrequenz messen. Diese Geber haben außerdem den Vorzug, in ihren äußeren Abmessungen entsprechend kleiner zu sein. Bei geschickter Ausnutzung des Materials und der konstruktiven Möglichkeiten

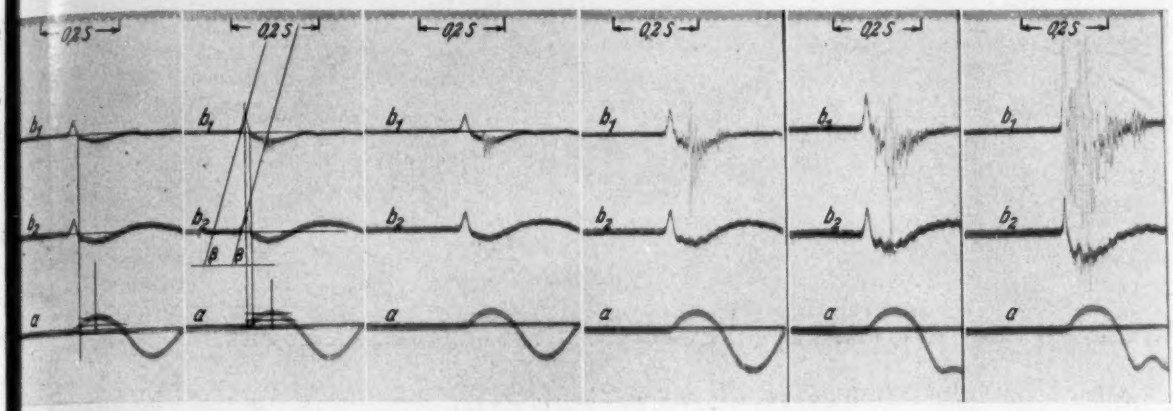


Abb. 16. Stoßaufnahmen mittels Kohlebeschleunigungsmesser (b_1), Kondensatorgeber (b_2) und Schwingwegmesser (a) Mit zunehmender Stoßhärte tritt bei dem weniger gedämpften Meßkörper die Eigenschwingung stark hervor und verzerrt die Beschleunigungsanzeige

kann man zweifellos noch kleinere Geberformen, als sie in Abb. 7 dargestellt sind, herstellen. Die durch die höhere Eigenfrequenz bedingte geringere Empfindlichkeit für tiefe Frequenzen wird durch genügend hohe Verstärkung ausgeglichen. Der erfaßte Frequenzbereich des Meßgerätes ist dann weitgehend nur von der Summerspannung, von der Verstärkung und dem Aussteuerbereich der benutzten Röhren abhängig.

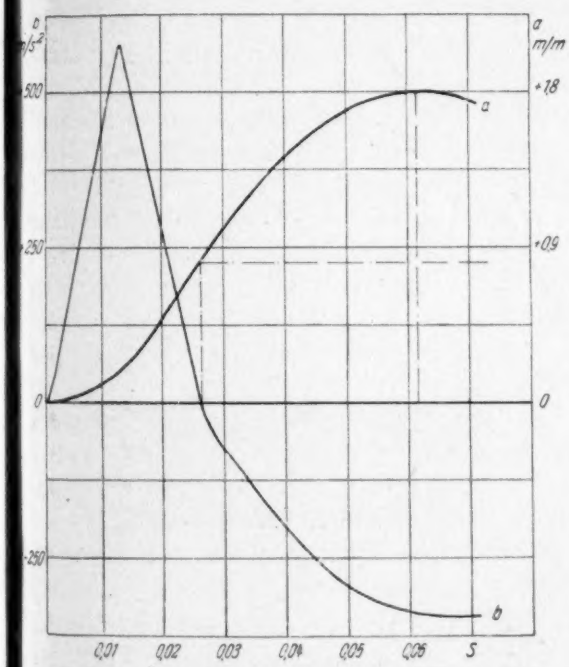


Abb. 17. Durch Integration gefundener Verlauf des Schwingweges (a) für einen Beschleunigungsstoß (b), wie ihn die Oszillogramme der Abb. 16 zeigen

Zusammenfassung

Die Konstruktion neuzeitlicher Schwingungsmesser für die Fahrzeug- und Flugtechnik wird durch Forderungen der Praxis stark beeinflußt. Die Forderungen an das Meßgerät lassen sich wie folgt zusammenfassen: Genügende Meßgenauigkeit bei einfacher Bedienung, geringes Gewicht bzw. kleine Abmessungen des Meßkörpers. Ermöglichung von gleichzeitiger Aufnahme an verschiedenen Stellen, ohne allzu großen Apparaturumfang. Aufnahme nur einer physikalischen Meßgröße in einem möglichst großen Frequenzbereich.

Die Erfüllung dieser Forderungen ist an die Benutzung elektrisch arbeitender Geräte gebunden. Es wird die Frage der Verstärkung tieffrequenter Schwingungen an drei Beispielen behandelt. Von diesen ist auf das Trägerfrequenzverfahren als eine besonders aussichtsreiche Methode näher eingegangen worden.

Es wird ein auf diesem Verfahren beruhender Beschleunigungsmesser näher beschrieben und seine Meßgenauigkeit an passenden Beispielen gezeigt. *(Eingegangen am 15. März 1938.)*

Beobachtungen und Messungen an einem neuen Gerät zur Klangsynthese[1])

Von Siegfried Nahrgang

(Mit 16 Abbildungen)

Einleitung

Man sollte erwarten, daß bei der mechanischen, elektrischen oder sonstwie gearteten sekundären Wiedergabe von akustischen Vorgängen das Dargebotene von einem musikalisch geschulten Ohr nur dann als vollkommen mit dem Original übereinstimmend empfunden wird, wenn Reproduktion und Original kongruent sind.

Bekanntlich ist das Ohr jedoch großen Täuschungen unterworfen und der subjektive Klangeindruck ist oft ein anderer, als objektiv zu erwarten gewesen wäre.

In dieser Arbeit soll ein Beitrag geliefert werden zu den Beziehungen zwischen objektiver und subjektiver Klanganalyse.

Bei subjektiven Untersuchungen wie den vorliegenden sind bei der Beurteilung der Ergebnisse die Eigenschaften des menschlichen Ohres zu berücksichtigen.

Der messende Forscher ist von seinen Instrumenten her eine verhältnismäßig große Genauigkeit gewöhnt. Zieht er Vergleiche zwischen diesen und dem menschlichen Ohr, so findet er, daß sich das Ohr als Meßinstrument schlecht eignet. Es kann nicht geeicht werden, es hat keinen festen Nullpunkt, es hat eine sehr unhomogene Skala, ja es kann sogar Dinge anzeigen, die in Wirklichkeit gar nicht vorhanden sind (Nichtlinearität des Ohres). Hierzu kommt noch, daß die Fehler bei den einzelnen Personen verschieden stark ausgeprägt sind.

Sofern gewisse Grenzen nicht überschritten werden, nimmt das Ohr Abweichungen vom Original nicht wahr. Es wäre demnach festzustellen, wie weit sich Original und Reproduktion voneinander unterscheiden dürfen, damit das Ohr dies noch gerade eben nicht bemerkt. Subjektiv gesehen ist die Reproduktion dann immer noch einwandfrei.

Hier wurde besonderer Wert darauf gelegt festzustellen, wann das Ohr einzelne Harmonische aus Klängen noch hört und inwieweit sich bei Klängen Änderungen in den Teiltonamplituden bemerkbar machen. Die Aufgabe läuft also auf die Untersuchung von Verdeckungserscheinungen hinaus, wobei verdeckter und verdeckender Ton immer in einem harmonischen Verhältnis zueinander stehen und auch mehrere verdeckende Töne gleichzeitig vorkommen sollen.

Versuchsapparatur

Will man die geplanten Untersuchungen an Klängen vornehmen, so muß zuerst ein Gerät gebaut werden, das in der Lage ist, Tonfrequenzen zu liefern, die genau harmonisch zur tiefsten vorhanden sind. Als zusätzliche Forderung tritt noch hinzu, daß die einzelnen Harmonischen sinusförmig sein sollen.

Es wäre möglich Pfeifen zu benutzen, hinter die akustische Siebe geschaltet sind, wie es z. B. STUMPF[2]) gemacht hat. Als Nachteile treten hier auf, daß die Frequenzen nicht beliebig variiert werden können und keine absolute Gewähr dafür gegeben ist, daß die Töne auch wirklich in harmonischem Verhältnis zueinander stehen.

Bei der Verwendung von Lochsirenen würde das zweite Bedenken wegfallen; durch geeignete Lochzahl erhält man immer Harmonische. Die Frequenz wäre einstellbar, wenn auch nur in

[1]) Von der Technischen Hochschule Karlsruhe (D 90) genehmigte Dissertation.

[2]) C. STUMPF: Die Sprachlaute. Berlin 1926.

engen Grenzen. Die Kurvenform wäre jedoch bestimmt nicht ohne weiteres sinusförmig.

K. W. Wagner veröffentlichte die Beschreibung eines Generators für harmonische Tonfrequenzen[3]) bei dem mit Hilfe von Kippschwingungen eine sehr große Anzahl von Teiltönen erzeugt wird. Von diesen können durch Filter (Formantkreise) fünf Teiltonbereiche ausgesiebt und zu einem neuen Spektrum zusammengesetzt werden. Die Anordnung wird zur Nachbildung von Vokalen benutzt. Die Siebe sind daher bezüglich ihrer Dämpfung und Resonanzfrequenz den Formantgebieten der menschlichen Sprache angepaßt und lassen infolgedessen mehrere Teiltöne gleichzeitig durch. Es werden mit ihnen ganze Gebiete von Harmonischen erfaßt und nicht einzelne Harmonische gesondert ausgesiebt. Da bei den hier beabsichtigten Versuchen jede einzelne Harmonische willkürlich einstellbar sein soll, hätte eine solche Anordnung, die für die Nachbildung von Vokalen besonders geeignet ist, den gestellten Bedingungen nicht genügt.

Großer Frequenzumfang bei sinusförmiger Kurvenform läßt sich mit einem Schwebungssummer erzielen. Allerdings liefert er immer nur einen Ton. Es müßte also für je eine Harmonische ein Schwebungssummer vorhanden sein. Hier tritt nun die Schwierigkeit auf, genau harmonische Frequenzen einzustellen. Noch viel schwerer ist es dann, sie auch beizubehalten, d. h. dafür zu sorgen, daß sich die Schwebungssummer im Verlaufe der Untersuchungen nicht gegenseitig verstimmen. Dieser Gleichlauf wäre bestimmt genau so schwer zu erreichen wie derjenige einer Anzahl von untereinander unabhängigen Pendeluhren, er gelingt nämlich nie!

Das Problem des Gleichlaufs ist dann zu lösen, wenn es gelingt, das Ganze irgendwie zentral zu steuern (siehe Synchronuhren, um bei diesem Beispiel zu bleiben). Es wird hier eine Lösung dafür angegeben. Bevor sie dargelegt wird, soll aber erst etwas näher auf das Wesen eines Schwebungssummers eingegangen werden.

Gegeben seien zwei Hochfrequenz-Generatoren (HF.-Generatoren), z. B. Röhrensender. Der eine sei fest abgestimmt, der andere veränderlich. Ihr Frequenzunterschied sei dadurch zwischen 0 Hz und ca. 10000 Hz einstellbar. Auf irgendeine Weise werde auf elektrischem Wege die Differenzfrequenz aus den beiden Hochfrequenzen gebildet. Diese liegt dann im Hörbereich und kann durch Ändern der Abstimmung des einen HF.-Generators beliebig verändert werden. Eine weitere Verstärkung bietet keine Schwierigkeiten. Das Beschriebene ist der schon lange bekannte Schwebungssummer[4]).

Nun kann man in Abweichung vom normalen Schwebungssummer folgendes machen:

Die beiden HF.-Spannungen, die die beiden HF.-Generatoren liefern, werden jede für sich zunächst stark verzerrt, derart, daß hinter dem verzerrenden Glied jede der beiden HF.-Spannungen in ein Gemisch von vielen zur jeweiligen Grundfrequenz harmonischen HF.-Spannungsanteilen übergeht. Hatte man ursprünglich die Frequenzen F_1 des einen Generators und F_2 des anderen Generators, so hat man jetzt F_1, $2F_1, \ldots, nF_1$ und $F_2, 2F_2, \ldots, nF_2$. Siebt man die Frequenzen jeweils gleicher Ordnungszahl aus und mischt sie, d. h. bildet die Differenzfrequenz, so erhält man:

(1) $F_1 - F_2 = f$	Das ist die Tonfrequenz, die der normale Schwebungssummer auch liefert;
(2) $2F_1 - 2F_2 = 2f$	Das ist die zweite Harmonische dieser Tonfrequenz;
(3)	
(n) $nF_1 - nF_2 = nf$.	Das ist die n-te Harmonische der Tonfrequenz.

Das Ergebnis ist eine Reihe von harmonischen Tonfrequenzen, also das, was wir brauchen.

[3]) K. W. Wagner, Ein neues elektrisches Sprechgerät zur Nachbildung der menschlichen Vokale. Berl. Ber. 1 (1933), S. 1. Als Einzelausgabe erschienen: Berlin 1936 im Verlag der Akademie der Wissenschaften in Kommission bei Walter de Gruyter & Co.

[4]) Siehe z. B. H. Geiger und K. Scheel, Hdb. d. Physik, Bd. 8, Akustik, S. 587.

Man kann sie superponieren und linear weiter verstärken, was keine Schwierigkeiten macht. Ist jede für sich in der Amplitude regelbar, so können beliebige Klänge hergestellt und im Lautsprecher abgehört werden, wobei die Möglichkeiten nur durch die Anzahl der zur Verfügung stehenden Harmonischen beschränkt sind. Das Prinzip einer solchen Anordnung ist in Abb. 1 dargestellt.

Man sieht, auf die beiden HF.-Generatoren SI und SII folgt jetzt je ein verzerrendes

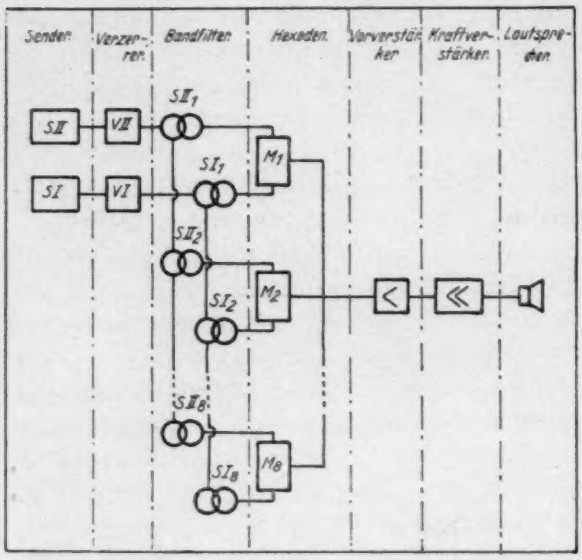


Abb. 1. Schematische Darstellung der Apparatur zur Erzeugung von harmonischen Tonfrequenzen

Glied VI und VII, daran anschließend je eine Reihe von Sieben zur Trennung der HF.-Harmonischen ($SI_1, \ldots, SI_8$ und $SII_1, \ldots, SII_8$), dann folgen die Mischglieder $M_1, \ldots, M_8$. In ihnen entstehen aus je zwei HF.-Harmonischen gleicher Ordnungszahl n die niederfrequenten (NF.)-Harmonischen der gleichen Ordnungszahl. Dann kommt die Superposition und die gemeinsame Weiterverstärkung.

Im Nachfolgenden seien die einzelnen Bestandteile dieser Apparatur näher beschrieben.

Die HF.-Generatoren und die Verzerrerstufen

Die beiden HF.-Generatoren und die Verzerrerstufen sind zu einer Einheit zusammengefaßt. Die Betriebsspannungen wurden über ein Netzanschlußgerät aus dem Wechselstromnetz bezogen, weil Anodenakkumulatoren in genügender Anzahl nicht zur Verfügung standen und sich die Verwendung von Trockenbatterien bei dem hohen Anodenstromverbrauch von selbst verbietet. Die Schaltung ist in den Abb. 2a, 2b und 3 wiedergegeben. Einiges sei kurz näher erläutert.

Der veränderliche Sender SI (Abb. 2a) ist ein rückgekoppeltes Schirmgitteraudion, dessen Schwingungskreis mit Hilfe des Drehkondensators C_1 abgestimmt werden kann. Mit ihm wird die Höhe der Tonfrequenz eingestellt. Zur Erzeugung einer kleinen negativen Vorspannung dient der Widerstand R_K in der Kathodenleitung der Röhre, während der Widerstand R_g in bekannter Weise zur Stabilisation des Senders dient (BARKHAUSEN[5]), MÖLLER[6])). Hier und auch in allen anderen Fällen sind sämtliche Anodenleitungen gegen das Eindringen von HF.-Spannungen durch Drosseln und Kondensatoren abgeriegelt. Das ist erforderlich, weil die Anodenspannungsquelle für die beiden Sender und die Verzerrerstufen gemeinsam ist und einen endlichen inneren Widerstand hat. Der Sender SI ist auf ungefähr 95 kHz abgestimmt.

Am anodenseitigen Ende des Schwingungskreises ist über einen kleinen Kondensator von 50 pF das verzerrende Glied angeschlossen. Es besteht aus einer Dreipolröhre mit so großer negativer Vorspannung, daß immer nur die Spitzen der Gitterwechselspannung in den stromführenden Bereich der Röhrenkennlinie hineinragen. Dadurch werden auf der Anodenseite sehr steile Stromstöße hervorgerufen, die von großen stromlosen Pausen unterbrochen sind. Eine FOURIER-Zerlegung solcher Stromstöße liefert bekanntlich eine große Anzahl von Harmonischen. Da die Gittervorspannung dieser Röhre der Amplitude der HF.-Spannung angepaßt werden muß, ist sie veränderlich und kann über ein Potentiometer (P_1 bzw. P_2 im Schaltbild des Netzteiles. Abb. 3) eingestellt werden.

[5]) H. BARKHAUSEN, Elektronenröhren, Bd. 3. S. 55. Leipzig 1935.

[6]) H. G. MÖLLER, Die Elektronenröhren, S. 138f. Braunschweig 1929.

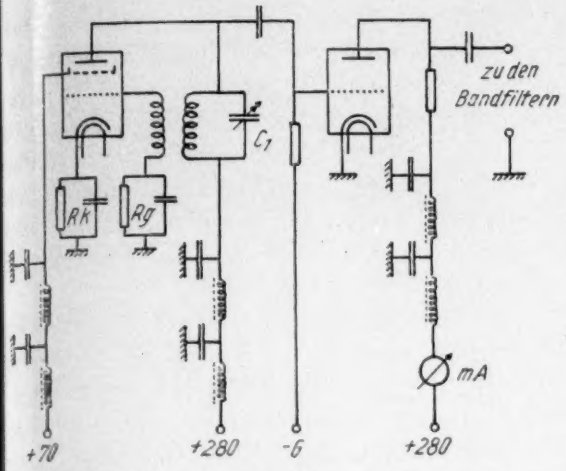


Abb. 2a. Der veränderliche Sender *S I*

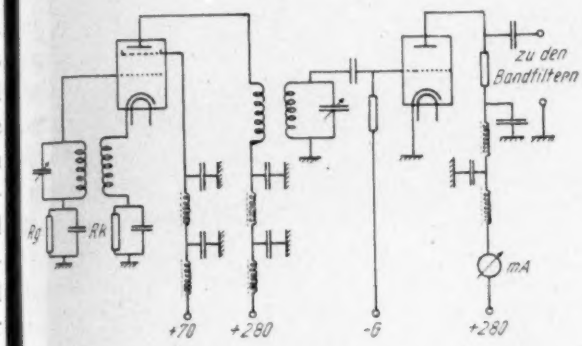


Abb. 2b. Der konstante Sender *S II*

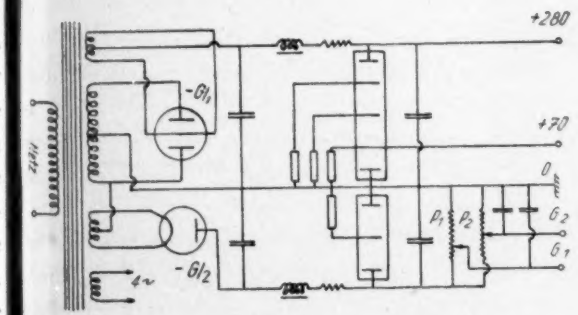


Abb. 3. Netzteil der beiden Sender und Verzerrerröhren

Zur Kontrolle dient ein im Anodenkreis der Verzerrerröhre liegendes Milliamperemeter.

Beim Sender *SII* (Abb. 2b) muß auf eine Frequenzkonstanz besonders gesehen werden, damit man nicht gezwungen ist, ihn immer wieder auf die Bandfilter abzustimmen. Außerdem muß vermieden werden, daß Einstellungen am Verzerrer rückwirkend die Senderfrequenz ändern. Daher wurde für den Sender *SII* eine Schaltung gewählt, bei der die Rückkopplungsspule nicht im Anodenzweig, sondern im Kathodenzweig der Röhre angeordnet ist. Als Röhre findet wieder eine Schirmgitterröhre Verwendung. Da das Schirmgitter bezüglich der HF.-Spannung an Erdpotential gelegt ist, sind Anode und Steuergitter weitgehend voneinander entkoppelt und können sich nur noch wenig gegenseitig beeinflussen. Um diese Beeinflussung noch geringer zu machen, ist der mit der Anode gekoppelte Kreis auf die zweite Harmonische abgestimmt. Dieser Kreis liegt am Gitter der zweiten Verzerrerröhre, die genau so arbeitet wie die erste auch.

Der Netzteil der Einheit Sender + Verzerrerstufen liefert in bekannter Weise sämtliche Betriebsspannungen. Die Anodenspannung wird durch Glimmstreckenspannungsteiler[7]) (Stabilisatoren) konstant gehalten. Die für die Verzerrerstufen benötigte negative Vorspannung ist so hoch, daß es sich nicht empfiehlt, sie in der sonst üblichen Weise mit Hilfe eines Spannungsteilers, an dem die ganze Anodenspannung liegt, herzustellen. Sie wird infolgedessen mit einer besonderen Gleichrichterröhre erzeugt und ebenfalls stabilisiert.

Durch Verwendung von Stabilisatoren sind Spannungsschwankungen des Netzes auf der Gleichstromseite nur noch mit wenigen Prozenten ihrer ursprünglichen Amplitude vorhanden. Bei den sehr stark negativ vorgespannten Verzerrerröhren machen sich jedoch ganz geringe relative Gitterspannungsänderungen schon sehr stark bemerkbar, da die absolute Spannungsänderung maßgebend ist. Es muß also Wert darauf gelegt werden, daß das benutzte Netz genügend konstant ist.

Die Drehkondensatoren und Spulen sind zur Vermeidung von kapazitiven und induktiven Streufeldern in Abschirmbechern untergebracht. Als Spulen werden hier und auch in allen anderen Fällen wegen ihres geringen Raumbedarfs und wegen der Möglichkeit, die Kopp-

[7]) F. Schröter und L. Körös, Telefunkenröhre 4 (1935), S. 164.

lung ohne Schwierigkeiten zu ändern, Kreuzwickelspulen verwendet.

Während des Betriebs zeigte es sich, daß die beiden HF.-Generatoren doch noch nicht genügend frequenzkonstant arbeiteten, obwohl alle Betriebsspannungen konstant gehalten wurden. Die aufgetretene gleichmäßige Frequenzänderung ist darauf zurückzuführen, daß infolge von Temperaturschwankungen des Raumes sich die elektrischen Daten der Schwingungskreise änderten. Dazu kommt noch, daß beim schwingenden Sender im Schwingungskreis ein beachtlicher hochfrequenter Wechselstrom fließt, der durchaus in der Lage ist, Spulen und Kondensatoren, wenn auch wenig, zu erwärmen. Sehr viel empfindlicher als die Spulen mit ihrer großen Oberfläche und Kühlmöglichkeit sind dabei die kleinen Festkondensatoren, die zur Vergrößerung der Kapazität den Drehkondensatoren parallel liegen. Ihre Kapazitätsänderung trägt auch am meisten zu der Inkonstanz der Sender bei.

Hier wurde nach ROHDE[8]) dadurch abgeholfen, daß Kondensatoren mit negativem und positivem Temperaturkoeffizienten parallelgeschaltet und dadurch ein Ausgleich geschaffen wurde.

Aussieben und Mischen der einzelnen HF.-Harmonischen

An die Ausgänge der beiden Verzerrerstufen sind je acht Bandfilter angeschlossen, die die einzelnen Harmonischen der HF. auszusieben haben. Die Bandfilter bestehen aus zwei identischen induktiv gekoppelten Schwingungskreisen, die auf die gewünschte Frequenz abgestimmt sind. Es handelt sich also um die gleiche einfache Form von Bandfiltern, wie sie auch im Rundfunk-Empfängerbau mit gutem Erfolg angewendet werden. Mit Hilfe kleiner eingebauter Trimmerkondensatoren konnten die Kreise später im Betrieb genau abgeglichen werden. Dabei wurden die Bandfilter, auf die der veränderliche Sender arbeitet, auf eine Frequenz abgestimmt, die einer mittleren Tonhöhe entspricht. Die Lochbreite der Siebe ist so groß, daß zur Erzeugung ganz tiefer und ganz hoher Töne noch genügend Spannung zur Verfügung steht. Die Sekundärseiten der Bandfilter sind an die beiden Steuergitter von acht Mischhexoden angeschlossen (Schaltbild Abb. 4). Da alle acht Mischkreise identisch sind, sei die Beschreibung auf einen einzigen beschränkt.

Das hinter dem Sender SI liegende auf die Frequenz F_1 abgestimmte Bandfilter SI_1 liegt am ersten Steuergitter der ersten Mischhexode M_1 und das hinter dem Sender SII liegende auf die Frequenz F_2 abgestimmte Bandfilter

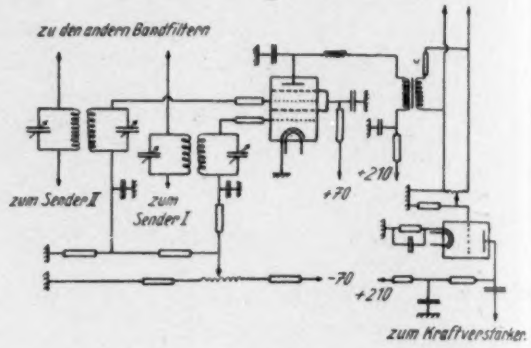


Abb. 4. Die Mischstufe

SII_1 liegt mit seinem Ausgang am zweiten Steuergitter der gleichen Mischhexode. In dieser entsteht also die Frequenz $F_1 - F_2 = f$. Die Tonfrequenz f wird im Anodenkreis der Röhre über einen NF.-Transformator abgenommen.

In den Mischhexoden wird auch gleichzeitig die Amplitudenreglung der NF.-Spannung vorgenommen und zwar in der gleichen Weise, in der dies auch bei Fadinghexoden geschieht, nämlich durch Vergrößern oder Verkleinern der Vorspannung der beiden Steuergitter. (In Wirklichkeit werden für die Mischung keine Mischhexoden, also Röhren der Type RENS 1224, sondern Fadinghexoden, also Röhren der Type RENS 1234 verwendet. Mit diesen gelingt es besser, die beiden Funktionen der Mischung und der Amplitudenreglung in einer Röhre zu vereinigen. Als das Gerät gebaut wurde, waren die genannten Typen die einzigen auf dem Markt befindlichen Mischröhren.)

Der Vorgang des Mischens in einer Hexode sei kurz beschrieben. Eine Hexode ist eine Röhre mit zwei Steuergittern. (Die anderen

[8]) L. ROHDE, Z. techn. Physik 15 (1934), S. 613 und Funk (1934), S. 833.

noch vorhandenen Gitter interessieren hier nicht.) Der Anodenstrom wird also an zwei Stellen unabhängig voneinander gesteuert, ist also eine Funktion von zwei unabhängigen Veränderlichen. Für kleine Gitterwechselspannungen u_g kann man daher den Anodenstrom in eine TAYLOR-Reihe entwickeln und kann schreiben

$$I_a + i_a = f(U_{g1} + u_{g1},\ U_{g2} + u_{g2})$$

$$I_a + i_a = f(U_{g1},\ U_{g2})$$

$$+\frac{1}{1!}\left[\frac{\partial I_a}{\partial U_{g_1}} u_{g1} + \frac{\partial I_a}{\partial U_{g_2}} u_{g2}\right]$$

$$+\frac{1}{2!}\left[\frac{\partial^2 I_a}{\partial U_{g_1}^2} u_{g1}^2 + 2\frac{\partial^2 I_a}{\partial U_{g1}\,\partial U_{g2}} u_{g1} u_{g2} + \frac{\partial^2 I_a}{\partial U_{g_2}^2} \cdot u_{g2}^2\right].$$

$$+ \ldots\ldots\ldots\ldots$$

U_{g1} und U_{g2} sind die Gittervorspannungen. $f(U_{g1}, U_{g2})$ ist dann der Anodenruhestrom I_a. $\frac{\partial I_a}{\partial U_{g1}}$ ist die Steilheit der Röhre bezogen auf das erste Steuergitter, $\frac{\partial I_a}{\partial U_{g2}}$ die Steilheit bezogen auf das zweite Steuergitter. Von den höheren Ableitungen interessiert nur noch $\frac{\partial^2 I_a}{\partial U_{g1}\,\partial U_{g2}}$, die Mischsteilheit. Es seien weiterhin $u_{g1} = A_1 \sin \omega_1 t$ und $u_{g2} = A_2 \sin \omega_2 t$ die Wechselspannungen an den beiden Gittern. Sie seien so klein, daß man die Reihe nach wenigen Gliedern abbrechen kann. Setzt man u_{g1} und u_{g2} ein, so erhält man auf der Anodenseite einen Stromanteil $\frac{\partial I_a}{\partial U_{g1}} A_1 \sin \omega_1 t$ und einen Stromanteil $\frac{\partial I_a}{\partial U_{g2}} A_2 \sin \omega_2 t$, d. h. die Röhre wirkt wie ein gewöhnlicher Verstärker.

Die beiden Glieder $\frac{\partial^2 I_a}{\partial U_{g1,\,2}^2} u_{g1,\,2}^2$ liefern

$$\frac{\partial^2 I_a}{\partial U_{g1,\,2}^2} A_{1,\,2}^2 \left[\frac{1}{2} - \frac{1}{2}\cos 2\,\omega_{1,\,2}\, t\right],$$

also einen Richtstrom- und einen Wechselstromanteil mit der doppelten Frequenz, nämlich $2\,\omega_2$ und $2\,\omega_1$.

Das Glied $\frac{\partial^2 I_a}{\partial U_{g1}\,\partial U_{g2}} u_{g1} u_{g2}$ liefert

$$\frac{\partial^2 I_a}{\partial U_{g1}\,\partial U_{g2}} A_1 A_2 \sin \omega_1 t \sin \omega_2 t$$

$$= \frac{\partial^2 I_a}{\partial U_{g1}\,\partial U_{g2}} A_1 A_2 \frac{1}{2}\left[\cos(\omega_1 - \omega_2)\, t - \cos(\omega_1 + \omega_2)\, t\right].$$

Es enthält einen Stromanteil mit der Kreisfrequenz $(\omega_1 + \omega_2)$ und einen mit der Kreisfrequenz $(\omega_1 - \omega_2)$. Dieser letzte Anteil ist die Tonfrequenz, die als Differenz aus den beiden Hochfrequenzen entsteht. Die Amplitude dieses Gliedes ist

$$\frac{\partial^2 I_a}{\partial U_{g1}\,\partial U_{g2}} A_1 A_2 .$$

Sie wird um so größer sein, je größer A_1 und A_2 sind und je größer die Mischsteilheit ist. Mit einer Vergrößerung der negativen Vorspannungen U_{g1} und U_{g2} werden die einfachen Steilheiten und auch die Mischsteilheit kleiner und gehen bei genügend großen Vorspannungen gegen Null. Infolgedessen kann man durch Verändern der Gittervorspannung die Mischsteilheit regeln und damit die Amplitude der Tonfrequenz von Null bis zur maximalen Amplitude beliebig einstellen.

Alle in der Reihe vorkommenden Glieder liefern Frequenzen, die dem Bildungsgesetz $m\,\omega_1 \pm n\,\omega_2$ gehorchen, wobei m und n beliebige ganze Zahlen und auch Null sein können. Nur der Fall, in dem erstens die Differenz zu bilden ist und zweitens $m = n$ ist, liefert eine Tonfrequenz. Der Fall $m = n = 1$ ist schon behandelt. Den Fall $m = n = 2$ liefert das oben nicht mehr angegebene Glied

$$\frac{\partial^4 I_a}{\partial U_{g1}^2\,\partial U_{g2}^2} u_{g1}^2 u_{g2}^2$$

$$= \frac{\partial^4 I_a}{\partial U_{g_1}^2\,\partial U_{g_2}^2} A_1^2 A_2^2 \left[\frac{1}{2} - \frac{1}{2}\cos 2\,\omega_1 t\right] \cdot \left[\frac{1}{2} - \frac{1}{2}\cos 2\,\omega_2 t\right].$$

Dies Glied ist von so hoher Ordnung und daher so klein, daß es vernachlässigt werden darf, was für die noch höheren Ableitungen mit noch größerer Berechtigung gilt.

Man sieht daraus, wenn die beiden Kennlinienscharen der Hexode nicht allzu krumm sind (d. h. wenn die höheren Ableitungen verschwinden), erhält man immer eine sinusförmige Tonfrequenz, vorausgesetzt, daß die beiden Gitterwechselspannungen auch sinusförmig waren. Ja, es genügt sogar, wenn nur eine davon sinusförmig ist, wie man leicht ableiten kann. Für den Fall, daß beide Gitterwechselspannungen

nicht sinusförmig sind, erhält man natürlich auch keine sinusförmige Tonfrequenz. Der Klirrfaktor ist dann aber höchstens gleich dem Produkt der beiden ursprünglichen Klirrfaktoren. Nimmt man beispielsweise an, in den beiden HF.-Spannungen seien infolge mangelhafter Siebung durch die Bandfilter die beiden benachbarten Harmonischen der gewünschten Hochfrequenz noch mit je 10% enthalten, so entspricht das einem Klirrfaktor von 14%. In der Tonfrequenz sind die beiden benachbarten Harmonischen jedoch nur noch mit je 1% enthalten, woraus sich ein Klirrfaktor von 1,4% berechnet.

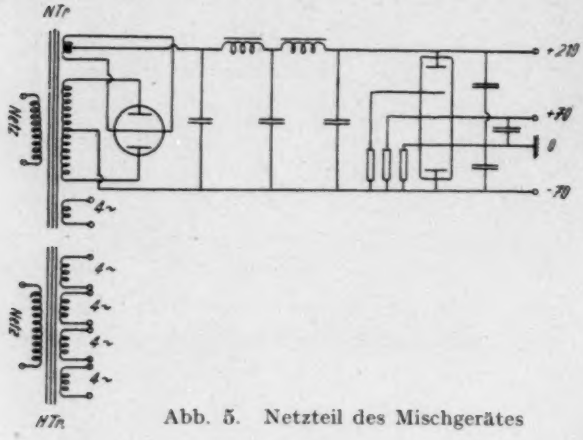


Abb. 5. Netzteil des Mischgerätes

Im Anodenkreis der Hexode werden die HF.-Spannungsanteile durch einen Kondensator und eine Drossel nach Erde abgeleitet bzw. vom NF.-Teil ferngehalten, während die NF.-Spannung über einen NF.-Transformator entnommen wird. (Siehe Schaltbild Abb. 4.)

Die Sekundärseiten dieser Transformatoren sind jeweils in Reihe geschaltet mit einem Widerstand W von 20000 Ohm. Diese Reihenschaltungen sind alle parallelgeschaltet und über ein Potentiometer, das zur Lautstärkereglung dient, an das Gitter einer als Verstärker wirkenden Dreipolröhre gelegt. Ist die Leerlaufspannung auf der Sekundärseite eines jeden Transformators gleich E, so wird die am Potentiometer liegende Spannung, da es acht Transformatoren sind, auf $\frac{E}{8}$ reduziert, vorausgesetzt, daß das Potentiometer sehr hochohmig ist.

Die 16 Bandfilter, die 8 Mischröhren, die Verstärkerstufe und der gemeinsame Netzanschlußteil waren zu einer Einheit zusammengefaßt und auf einem Aluminium-Chassis montiert. (Siehe Abb. 7.)

Bei der sehr großen nachfolgenden Verstärkung bereitete der Netzbetrieb des Mischgerätes

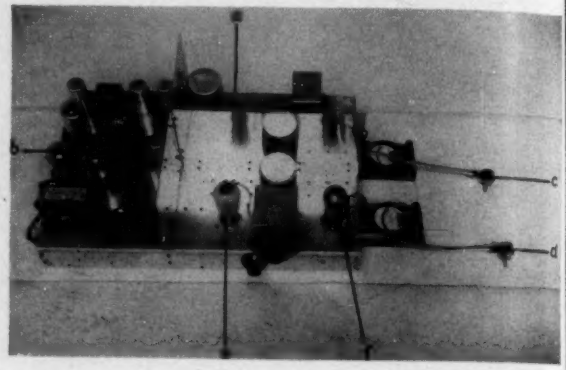


Abb. 6. Die beiden HF.-Generatoren und Verzerrerröhren mit Netzteil

a = Sender *S II* mit Verzerrer-Röhre *V II* (im Bild verdeckt)
b = Netzteil
c = zu den Bandfiltern $S\,II_1 - S\,II_8$
d = zu den Bandfiltern $S\,I_1 - S\,I_8$
e = Sender *S I*
= Verzerrerröhre *V I*

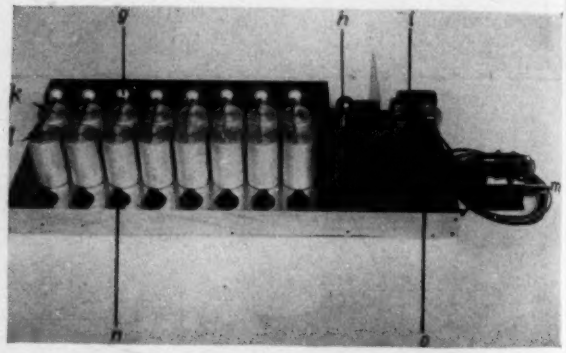


Abb. 7. Das Mischgerät mit Netzteil

g = die 8 Mischhexoden (im Bild ist nur die Abschirmkappe über dem Gitteranschluß zu sehen)
h = Vorverstärker
i = Netzteil
k = die Bandfilter $S\,II_1 - S\,II_8$
l = die Bandfilter $S\,I_1 - S\,I_8$
m = Netztransformator
n = Amplitudenreglung der Harmonischen
o = Heiztransformator

anfänglich große Schwierigkeiten, da das Netzbrummen noch viel zu sehr mit durchkam. Zur Abhilfe wurde die Anodenspannung zweimal gesiebt und mit einem Glimmstreckenspannungsteiler stabilisiert. (Schaltbild siehe Abb. 5.) Dann wurden die acht Ausgangstransformatoren der Hexoden mit einem doppelten Ge-

häuse aus Aluminiumblech und Eisenblech gegen magnetische Felder abgeschirmt. Diese Maßnahmen brachten schon eine wesentliche Besserung. Eine weitere Besserung wurde dadurch erreicht, daß der Netztransformator in ca. 1,5 m Entfernung vom Gerät aufgestellt wurde. Der Heiztransformator, der die Heizspannung für die acht Hexoden liefert, war auf dem Chassis geblieben, wurde aber so lange gedreht, bis die durch sein Streufeld hervorgerufene Störung ein Minimum geworden war. Als dann noch in die Verbindungsleitung zwischen Mischgerät und Kraftverstärker ein einfaches Filter für 50 Hz eingebaut worden war, blieb als wesentliche Störung nur noch ein leises Röhrenrauschen übrig, das sich bei der angewendeten großen Verstärkung nicht mehr vermeiden läßt.

Durch weitgehende Abschirmung konnte die Apparatur gegen von außen kommende elektrische Störungen unempfindlich gemacht werden, so besonders auch gegen das Durchpfeifen von Rundfunksendern, deren Frequenz zufällig in die Nähe einer der Harmonischen der Apparatur fiel.

Die Wände des Raumes, in dem die akustischen Untersuchungen vorgenommen wurden, waren zur Vermeidung von Schallreflexionen mit stark schallschluckendem Material (Filz- und Stoffbespannung) ausgekleidet. Dadurch wurden auch von außen kommende akustische Störungen genügend herabgemindert.

Das Mikrophon

Zur Bestimmung des Schalldrucks diente ein Kondensatormikrophon in NF.-Schaltung mit nachfolgender Verstärkung in vier Stufen. Die ersten drei Stufen bestehen aus einer Loewe-Dreifachröhre (Type 3NF. Batt.), die mit dem Mikrophon zusammengebaut ist. Daran ist mit einer etwa 5 m langen Leitung, durch die gleichzeitig die Betriebsspannungen für die Loeweröhre zugeführt werden, die vierte Verstärkerstufe angeschlossen, die mit einer 5-Pol-Endröhre (Type RES 164) ausgerüstet ist. An den Ausgangsklemmen dieser Stufe liegt ein Spannungsmesser. Für kleine Ausgangsspannungen reichte die Empfindlichkeit dieses Instruments nicht mehr aus. Um sie zu steigern, wurde eine der beiden Zuleitungen zur Drehspule aufgetrennt, an Klemmen geführt und in Reihe mit ihr ein empfindliches Spiegelgalvanometer geschaltet, wodurch der Meßbereich leicht um eine Zehnerpotenz nach unten erweitert werden konnte.

Da man das Kondensatormikrophon als Druckempfänger ansehen kann, ist der Ausschlag des Spannungsmessers (bzw. des Galvanometers) proportional dem Schalldruck am Mikrophon. Es wurde im folgenden immer nur dieser Ausschlag gemessen und als Maß für den Schalldruck verwendet. Die Anzeige des Spiegelgalvanometers war rein quadratisch. Um die Frequenzabhängigkeit der ganzen Anordnung Mikrophon + Verstärker zu bestimmen, wurde das Mikrophon elektrostatisch mit konstanter Spannung über ein Hilfsgitter in bekannter Weise angezupft[9]). Die elektrostatische Eichung kann allerdings die Eichung im Schallfeld nicht vollständig ersetzen, weil bei dieser die Resonanz des vor der Membran liegenden Hohlraumes nicht in die Messung mit eingeht.

Bei allen späteren Messungen befand sich das Mikrophon in 17 cm Entfernung vor dem Lautsprecher, während der Abstand zwischen Lautsprecher und Beobachter 4,20 m betrug. Sowohl Mikrophon als auch der Beobachter befanden sich in der Lautsprecherachse.

Bestimmung des Schwellenwertes

Um ein Maß für die Lautstärke zu haben, sollen sämtliche Schalldrücke auf den Schwellenwert bezogen werden, d. h. es soll der Quotient gebildet werden aus dem gemessenen Schalldruck und dem Schalldruck an der Hörschwelle. Damit wird man auch gleichzeitig frei von allen Frequenzfehlern derjenigen Apparatur, mit welcher der Schalldruck bestimmt wird, denn bei der Bildung des Verhältnisses müssen diese ja herausfallen. Es gilt also zunächst den Schwellenwert zu bestimmen.

Da die unmittelbare Messung der Schwellenwerte mit Hilfe von Mikrophon und Verstärker

[9]) Siehe z. B. H. Geiger und K. Scheel, Hdb. d. Physik, Bd. 8, Akustik, S. 603.

Schwierigkeiten machte, mußten sie indirekt gemessen werden. Dazu wurde zunächst ein gut meßbarer Schalldruck eingestellt und dann in den Tauchspulenkreis des dynamischen Lautsprechers so lange Widerstand eingeschaltet, bis der Ton nur noch gerade eben gehört werden konnte, d. h. bis der Schwellenwert erreicht war. Der eingeschaltete Widerstand ist dann ein Maß für den jetzt noch herrschenden Schalldruck. Zur Kontrolle, ob der Schwellenwert der Lautstärke erreicht ist, wurde der Lautsprecher über eine Morsetaste kurzzeitig abgeschaltet. Durch die dadurch hervorgerufene Unstetigkeit in der Lautstärke des Tones konnte sein Vorhandensein noch bemerkt werden, wenn er vor Zuhilfenahme der Taste scheinbar schon verschwunden war. Besonders nützlich war diese Einrichtung bei den höheren Frequenzen, da im gleichen Frequenzgebiet auch das Ohrenrauschen liegt.

Aus dem eingeschalteten Widerstand erhält man den Schalldruck wie folgt: Bei konstanter elektromotorischer Kraft E im Lautsprecherkreis kann man schreiben

$$P = k\,E\,\frac{1}{R}\,.$$

Dabei ist P der Schalldruck, k ein Proportionalitätsfaktor und R der gesamte Widerstand im Lautsprecherkreis. Er setzt sich zusammen aus dem inneren Widerstand und dem Strahlungswiderstand, sie seien zusammengefaßt und R_i genannt und aus dem außen dazu geschalteten Widerstand R_a. Also

$$P = k\,E\,\frac{1}{R_i + R_a}\,. \tag{1}$$

Zur Bestimmung von R_i wird R_a so lange vergrößert, bis P auf die Hälfte des ursprünglichen Wertes (d. h. des Wertes für $R_a = 0$) zurückgegangen ist. Es muß dann $R_a = R_i$ sein. Für $R_a = 0$ sei der Schalldruck zu P_0 bestimmt. Dann ist $P_0 = k\,E\,\frac{1}{R_i}$ und daraus die EMK des Kreises $E = \frac{1}{k}\,P_0\,R_i$ und mit Gleichung (1)

$$P = P_0\,R_i\,\frac{1}{R_i + R_a}\,. \tag{2}$$

Je nach der Frequenz bewegt sich R_i zwischen 7 Ohm und 30 Ohm, während R_a zwischen 3000 Ohm und 50000 Ohm lag. Ohne großen Fehler kann man daher in (2) im Nenner R_i gegen R_a vernachlässigen. Dann wird

$$P = P_0\,\frac{R_i}{R_a}$$

oder

$$\log P = -\log R_a + \log P_0\,R_i\,.$$

Bei logarithmisch geteilten Koordinaten gibt das eine Schar von unter -45^0 geneigten Geraden, deren Parameter $P_0\,R_i$ ist. Eine experimentelle Kontrolle im Gebiete derjenigen Schalldrücke, die mit dem Mikrophon noch gemessen werden konnten, ergab vollkommene Übereinstimmung mit der berechneten Beziehung zwischen P und R_a.

Verdeckungserscheinungen

Verdeckungserscheinungen zwischen zwei Tönen wurden zuerst von A. M. Mayer[10]) bemerkt und von R. L. Wegel und C. E. Lane[11]) eingehend untersucht.

Das Ergebnis war kurz folgendes: Ein Ton mit dem Schalldruck P_0, der für sich allein eben noch hörbar ist, kann durch Hinzukommen eines zweiten, lauten Tones subjektiv zum Verschwinden gebracht werden, er wird von diesem verdeckt. Soll er gerade eben wieder hörbar werden, so muß man seinen Schalldruck auf den Wert P erhöhen. Das Verhältnis P/P_0 ist dann ein Maß für die Verdeckung und wird Verdeckungsgrad genannt. Er ist klein, wenn der verdeckte Ton viel tiefer liegt als der verdeckende, nimmt zu mit wachsender Annäherung der beiden Töne aneinander und nimmt wieder ab, wenn der verdeckte Ton viel höher liegt als der verdeckende.

Diese Abnahme hängt sehr stark von der Lautstärke des verdeckenden Tones ab. Sie ist bei großer Lautstärke klein. Ist der Frequenzunterschied zwischen verdeckendem und verdecktem Ton nur sehr gering, so treten Schwebungen auf, die eine genaue Messung des Verdeckungsgrades erschweren. Das gleiche ist der Fall, wenn die Frequenz des verdeckten Tones ungefähr ein ganzes Vielfaches derjenigen des

[10]) A. M. Mayer, Philos. Mag. 11 (1876), S. 500.
[11]) R. L. Wegel und C. E. Lane, Physic. Rev. 23 (1924), S. 266.

verdeckenden Tones ist und dieser eine genügend große Lautstärke hat. In diesem Falle werden die Schwebungen gebildet durch den verdeckten Ton und die infolge von Nichtlinearitäten im Ohr entstehenden höheren Harmonischen des verdeckenden Tones.

Bei den hier beschriebenen Versuchen wurden diese Schwebungen deshalb nie beobachtet, weil der verdeckte Ton immer eine genaue Harmonische des (tieferen) verdeckenden Tones war.

Das Vorhandensein eines zweiten Tones wird sich im Zusammenklang um so stärker bemerkbar machen, je uneinheitlicher der Zusammenklang empfunden wird. HELMHOLTZ[12]) spricht in diesem Fall von der Konsonanz oder Dissonanz zweier Töne, während STUMPF[13]) zur Erklärung der gleichen Erscheinung den Begriff der Verschmelzung eingeführt hat. HELMHOLTZ sagt, der Grad der Konsonanz zweier Töne ist um so größer, je weniger höhere Harmonische dieser Töne miteinander Schwebungen bilden. Die bei der vorliegenden Untersuchung benutzten reinen Töne haben aber ihrerseits keine harmonischen Obertöne, weshalb sich diese HELMHOLTZsche Theorie hier nicht anwenden läßt.

STUMPF braucht die höheren Harmonischen nicht. Er definiert die Stufen der Verschmelzung nach abnehmender Stärke geordnet folgendermaßen:

1. Die Verschmelzung der Oktave, Frequenzverhältnis 1 : 2.
2. Die Quinte, Frequenzverhältnis 2 : 3.
3. Die Quarte, Frequenzverhältnis 3 : 4.
4. Die natürlichen Terzen und Sexten, Frequenzverhältnis 4 : 5, 5 : 6, 3 : 5, 5 : 8.
5. Alle übrigen Tonkombinationen

und ergänzt, etwas besser als 5. sei die natürliche Septime (4 : 7).

Diese Definition gilt zunächst nur für die Intervalle innerhalb einer Oktave. STUMPF erweitert[14]) den Begriff der Verschmelzung aber auch auf Töne, die über eine Oktave hinausgehen. Er schreibt, daß ganz allgemein der Verschmelzungsgrad zweier Töne, die das Frequenzverhältnis $m : n \cdot 2^x$ haben, der gleiche sei wie derjenige zweier Töne mit dem Frequenzverhältnis $m : n$. Dabei ist $m < n$ und x eine (kleine) ganze Zahl.

Der sich hieraus ergebende Verschmelzungsgrad für die Harmonischen eines Grundtones ist in der folgenden Tabelle angegeben.

Grundton + Harmonische	Frequenzverhältnis	$m : n \cdot 2^x$	Gleicher Verschmelzungsgrad wie	Verschmelzungsgrad
1+2	1:2	$1:2 \cdot 2^0$	Oktave	1
1+3	1:3	$1:3 = 2:6$		
		$= 2:3 \cdot 2^1$	Quinte	2
1+4	1:4	$1:4 = 1:2 \cdot 2^1$	Oktave	1
1+5	1:5	$1:5 = 4:20$	natürliche	4
		$= 4:5 \cdot 2^2$	Terze	
1+6	1:6	$1:6 = 2:12$		
		$= 2:3 \cdot 2^2$	Quinte	2
1+7	1:7	$1:7 = 4:28$	natürliche	< 5
		$= 4:7 \cdot 2^2$	Septime[15])	
1+8	1:8	$1:8 = 1:2 \cdot 2^3$	Oktave	1

Die einzelnen Stufen der Verschmelzung gelten nur bis ungefähr 4000 Hz. Lagen beide Töne höher, so konnte STUMPF keine Verschmelzung mehr beobachten. Weiterhin schreibt er[16]): „Der Verschmelzungsgrad ist unabhängig von der Stärke und zwar sowohl von der absoluten als auch relativen Stärke." Er muß folglich auch in der Nähe der Hörschwelle erhalten bleiben (z. B. bei Verdeckungserscheinungen). Im nächsten Abschnitt schreibt STUMPF: „Durch Hinzufügen eines beliebigen dritten und weiteren Tones wird der Verschmelzungsgrad zweier gegebener Töne in keiner Weise beeinflußt." Für das Folgende ist die Tatsache von Bedeutung, daß der dritte Ton mit einem der beiden anderen verschmelzen kann.

Anwendung auf die Beobachtung von Klängen

Bei der Beobachtung von Klängen, die sich zusammensetzen aus dem Grundton und seinen

[12]) H. v. HELMHOLTZ, Die Lehre von den Tonempfindungen. 3. Aufl. Braunschweig 1870.

[13]) C. STUMPF, Tonpsychologie. Bd. 2. Leipzig 1890.

[14]) C. STUMPF, a. a. O. S. 139.

[15]) Etwas tiefer als die Septime der temperierten Stimmung.

[16]) C. STUMPF a. a. O. S. 136.,

höheren Harmonischen, müssen sich nun sowohl Verdeckung als auch Verschmelzung bemerkbar machen, weshalb sich aus dem Vorhergehenden folgende Gesetzmäßigkeiten ableiten lassen:

1. Die Mindestlautstärke, die erforderlich ist, um einen Teilton aus einem Klang herauszuhören, kann um so geringer sein (bezogen auf den Schwellwert), je geringer der Verschmelzungsgrad und je geringer der Verdeckungsgrad dieses Tones mit irgendeinem anderen Teilton des Klanges ist.

2. Die Mindestlautstärke kann bei gleichem Verschmelzungsgrad um so geringer sein, je größer der Frequenzabstand zwischen den verschmelzenden Tönen ist, da mit wachsendem Frequenzabstand der Verdeckungsgrad abnimmt.

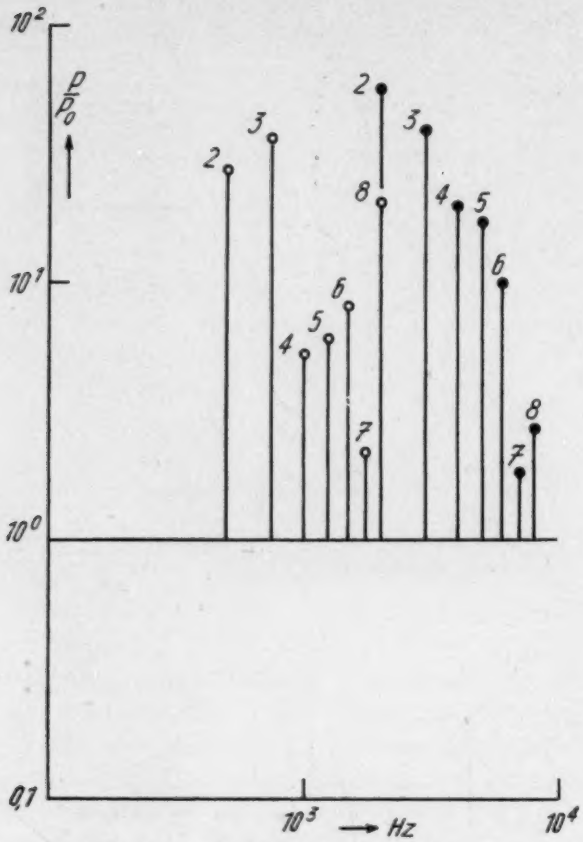


Abb. 8. Verdeckung der Harmonischen
Anzahl der verdeckenden Töne = 1
Frequenz des Grundtones: ○ = 256 Hz
● = 1024 Hz
Auf der Ordinate ist der Verdeckungsgrad der einzelnen Harmonischen aufgetragen

Zur Kontrolle dieser Gesetzmäßigkeiten wurden Versuche unternommen bei verschiedener absoluter Höhe des Grundtones und mit 1—5 verdeckenden Tönen, während die verdeckten Töne die restlichen der im ganzen vorhandenen acht Harmonischen waren. Als Frequenzen für den Grundton waren gewählt 256 Hz, 512 Hz, 1024 Hz, und einmal auch 2048 Hz. Der Schalldruck P der verdeckenden Töne war immer gleich dem 500fachen des Schalldruckes P_0 an der Schwelle.

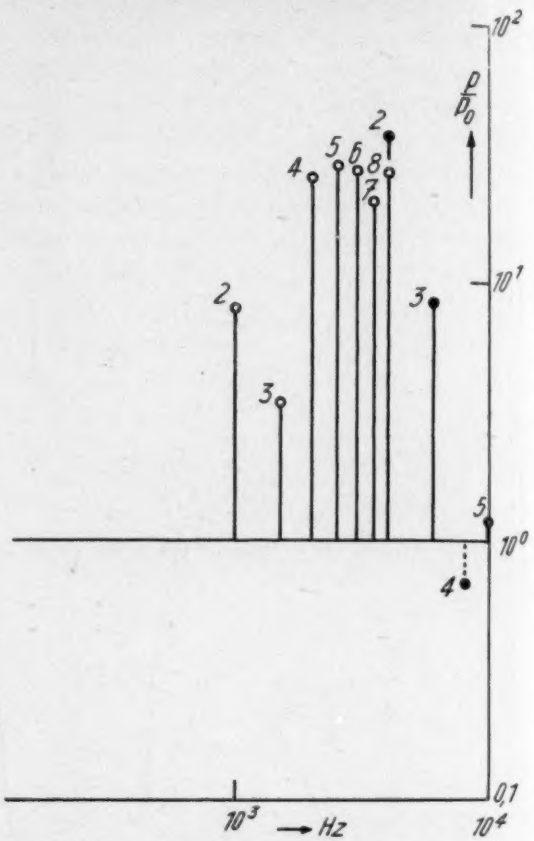


Abb. 9. Verdeckung der Harmonischen
Anzahl der verdeckenden Töne = 1
Frequenz des Grundtones: ○ = 512 Hz
● = 2048 Hz

Das Heraushören der Obertöne wurde dadurch sehr erleichtert, daß der betreffende Oberton zuerst so laut angegeben wurde, daß man ihn sich gut einprägen konnte. Die im Laufe der Versuche erworbene Übung machte diese Hilfe später mehr und mehr überflüssig.

Helmholtz schreibt hierzu[17]): „Will man anfangen, Obertöne zu beobachten, so ist es ratsam, unmittelbar vor dem Klange, welcher analysiert werden soll, ganz schwach diejenige Note erklingen zu lassen, welche man aufsuchen will." Und kurz vorher schreibt er: „Doch hat ein musikalisch geübter Beobachter darin einen wesentlichen Vorteil vor dem ungeübten, daß er sich leicht vorstellt, wie die Töne klingen müssen, welche er hören will, während der Ungeübte sich diese Töne immer wieder angeben muß, um ihren Klang frisch in Erinnerung zu haben."

Der Verlauf der Versuche soll an einigen Beispielen eingehender beschrieben werden.

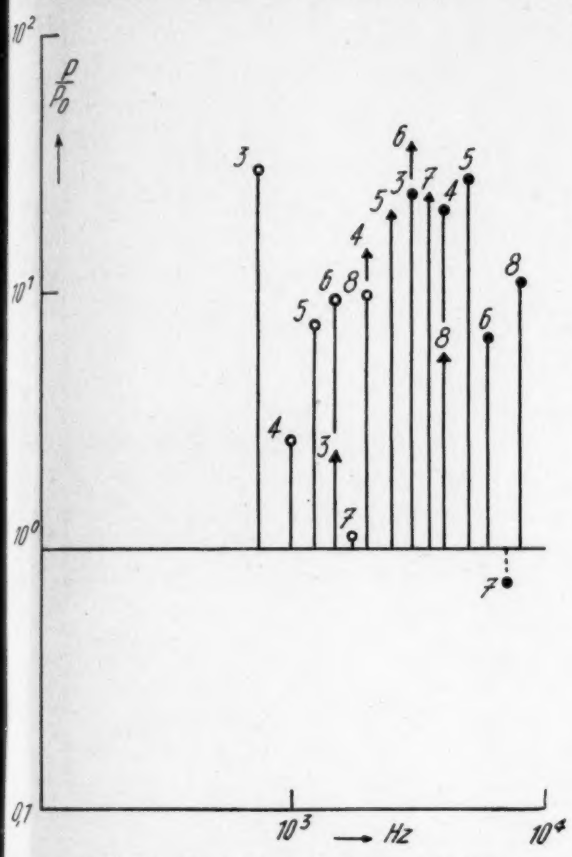


Abb. 10. Verdeckung der Harmonischen
Anzahl der verdeckenden Töne = 2
Frequenz des Grundtones: ○ = 256 Hz
▲ = 512 Hz
● = 1024 Hz

Es wurde der Grundton mit einer Frequenz von 256 Hz und einem Schalldruck $P_1 = 500\ P_{10}$ eingestellt. Der Schalldruck der zweiten Harmonischen wurde, von Null an beginnend, so lange vergrößert, bis diese neben dem Grundton gerade eben hörbar wurde. Dann wurde der Grundton abgeschaltet und der Schalldruck P_2 der zweiten Harmonischen gemessen und daraus bestimmt, das Wievielfache des Schwellendruckes nötig war, um die zweite Harmonische hörbar werden zu lassen, d. h. es wurde das Verhältnis P_2/P_{20} bestimmt. Daraufhin wurde die Zweite abgeschaltet und der Versuch mit dem Grundton und der Dritten wiederholt usf. Dann wurde die Versuchsreihe von neuem durchgeführt mit einem Grundton von 512 Hz, dann 1024 Hz usw. (siehe Abb. 8 und 9).

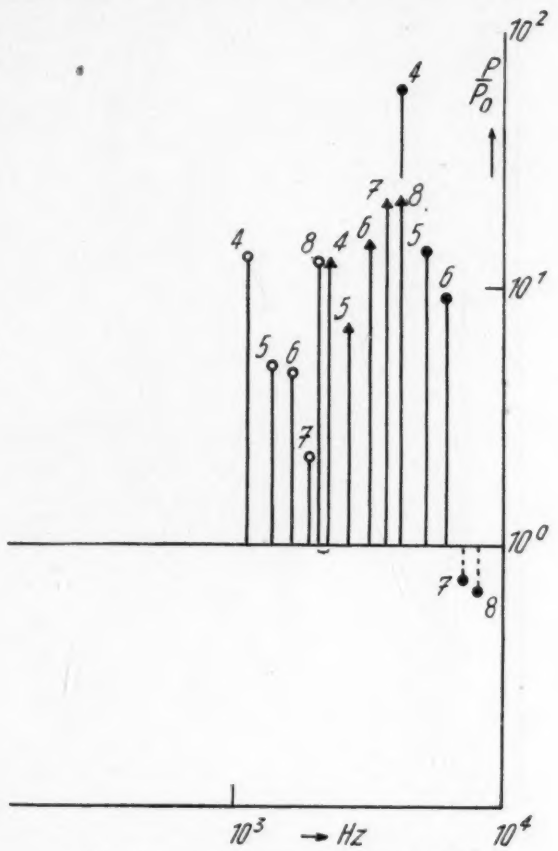


Abb. 11. Verdeckung der Harmonischen
Anzahl der verdeckenden Töne = 3
Frequenz des Grundtones: ○ = 256 Hz
▲ = 512 Hz
● = 1024 Hz

[17]) H. v. Helmholtz, a. a. O. S. 85.

Bei der nächsten Versuchsreihe wurde der Grundton (= 256 Hz) und dessen zweite Harmonische (= 512 Hz) mit je einem Schalldruck $P = 500\ P_0$ eingestellt und jetzt der Schalldruck der nächstfolgenden, also der dritten Harmonischen, so lange vergrößert, bis diese gerade eben hörbar wurde. Das gleiche geschah mit der 4., 5. usw. Diese Versuchsreihe wurde wiederholt mit einer Grundfrequenz von 512 Hz und 1024 Hz. Hier waren es zwei verdeckende und ein verdeckter, zusammen also immer drei Töne (siehe Abb. 10). Die übrigen Versuche mit 3, 4 und 5 verdeckenden Tönen wurden analog durchgeführt (siehe Abb. 11, 12 und 13). Da für gewöhnlich in einem Klang die Harmonischen mit niederer Ordnungszahl große Lautstärke haben, dürfte dieses Vorgehen gerechtfertigt sein.

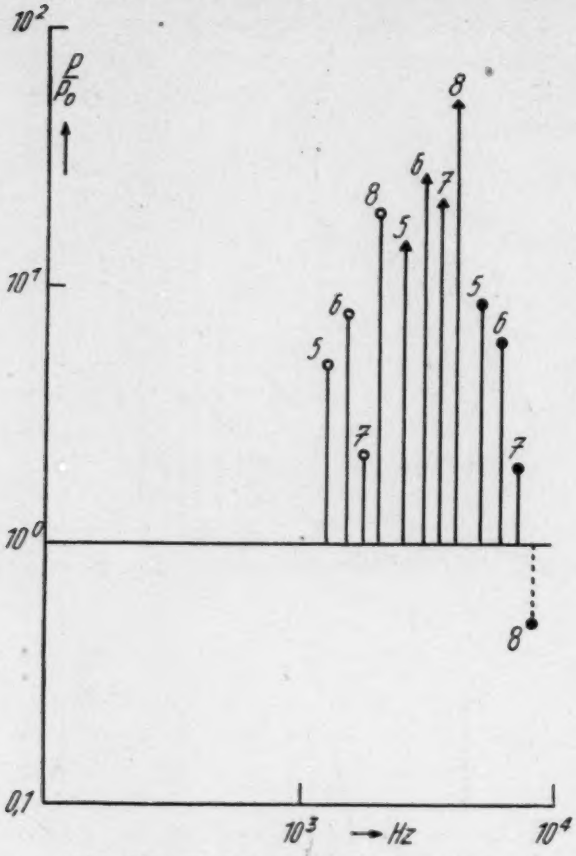


Abb. 12. Verdeckung der Harmonischen
Anzahl der verdeckenden Töne = 4
Frequenz des Grundtones: ○ = 256 Hz
▲ = 512 Hz
● = 1024 Hz

Die Schalldrücke, die nötig waren, um die einzelnen Töne eben mit dem Ohr wahrnehmbar werden zu lassen, lagen in allen Fällen so niedrig, daß die Empfindlichkeit des verwendeten Mikrophons und Verstärkers nur noch gerade eben genügt hätte. Infolgedessen wurde zur Messung der Schalldruck um ein bekanntes Maß vergrößert (durch Erhöhung der Verstärkung des dem Mischgerät nachgeschalteten Verstärkers) und dann rechnerisch reduziert.

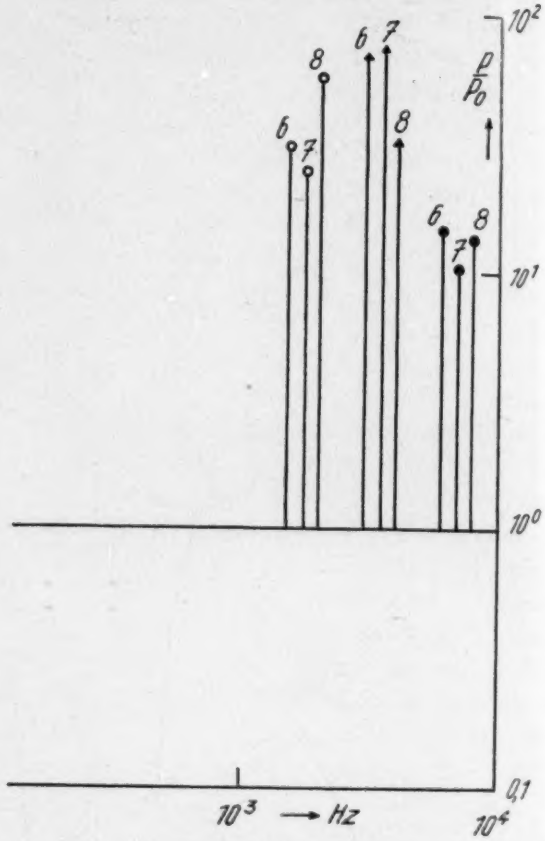


Abb. 13. Verdeckung der Harmonischen
Anzahl der verdeckenden Töne = 5
Frequenz des Grundtones: ○ = 256 Hz
▲ = 512 Hz
● = 1024 Hz

Die Ergebnisse der Versuche sind in den Abb. 8—13 dargestellt. Von einigen Ausnahmen abgesehen, die durch die Schwierigkeiten der subjektiven Beobachtung erklärlich werden, fällt folgendes auf:

a) Oberhalb von etwa 5000 Hz sind die Harmonischen fast immer bedeutend früher zu

hören als in den tieferen Lagen. Das entspräche Punkt 2 der aufgestellten Gesetzmäßigkeiten, denn mit wachsendem Frequenzabstand nimmt der Verdeckungsgrad ab.

b) In den tieferen Lagen wird die siebente Harmonische fast immer bedeutend früher gehört als alle anderen. Das entspräche Punkt 1, denn die siebente Harmonische hat den geringsten hier möglichen Verschmelzungsgrad.

c) Besonders bei den Versuchen mit mehreren verdeckenden Tönen (Abb. 12 und 13) werden die ungeraden Harmonischen meistens etwas früher gehört als die benachbarten geraden Harmonischen. Das entspricht wiederum Punkt 1, denn die ungeraden Harmonischen haben einen geringeren Verschmelzungsgrad als die benachbarten geraden.

Weiterhin fällt auf, daß im Gebiet der viergestrichenen Oktave (2048 Hz bis 4096 Hz) und darüber der Schalldruck mehr über den Schwellwert erhöht werden mußte als in den tieferen Lagen. Das rührt daher, daß der Beobachter in diesem Frequenzgebiet nicht so geübt war, zumal es in der Musik auch kaum direkt, sondern nur in Form von Obertönen vorkommt. Auch STUMPF erwähnt schon den Einfluß der Übung. Er schreibt[18]): „Sie ist eine spezielle für die einzelnen Regionen. Die für die Obertöne der zweigestrichenen Oktave erlangte Übung überträgt sich nicht ohne weiteres voll wirksam auf die viergestrichene und umgekehrt ..." Oberhalb von 4000 Hz bis 5000 Hz empfindet das Ohr die Töne immer unangenehmer, so daß keine allzugroße Übung dazu gehört, um sie herauszuhören.

Daß die gemessenen Werte für 7000 Hz bis 10000 Hz teilweise unter der Hörschwelle liegen, kann darauf zurückzuführen sein, daß bei der Bestimmung des Schwellwertes dieser etwas zu hoch ausgefallen ist. Zudem ist die Schwellwertkurve des Ohres ohnehin dauernden Schwankungen unterworfen (veränderlicher Nullpunkt).

Dann kann hier aber auch noch eine andere Erscheinung mitgewirkt haben. Bei der großen angewendeten Verstärkung war es natürlich nicht zu vermeiden, daß das Röhrenrauschen schließlich, wenn auch ganz schwach, hörbar wurde. Das Rauschen hat in den hohen Frequenzgebieten ein sehr dichtes Spektrum von Teiltönen. Das führt zu folgender Beobachtung. Wurde ein sehr hoher Ton langsam aufgedreht, so erschien zunächst ein Geräusch vom Charakter des deutschen „sch" oder „ch" mit der Klangfarbe des zu erwartenden Tones. Diese Erscheinung war aber nur bei ganz geringer Lautstärke zu beobachten. Wurde sie vergrößert, so verschwand der Charakter des „sch" bzw. „ch" sehr bald und der Ton wurde rein. Als Erklärung könnte man anführen, daß der geringe Schalldruck des Rauschens zusammen mit demjenigen des Tones genügte, um an dieser Stelle die Lautstärke merkbar über die Schwelle anzuheben. Sobald der Ton in der eben beschriebenen Form auftauchte, wurde er als über der Hörschwelle befindlich betrachtet und gemessen. Es kann natürlich sein, daß dann dabei ein zu kleiner Wert erhalten wurde. Auch dieser Fehler, der bestimmt nicht groß ist, erscheint unbedenklich, da es uns ja im wesentlichen auf den Gang der Änderung des Verdeckungsgrades ankommt.

Hörbarkeit der Klangfarbenänderung

Neben der Hörbarkeit der höheren Harmonischen in einem Klang interessiert natürlich auch die Hörbarkeit einer Klangfarbenänderung. Zur Untersuchung der dabei auftretenden Erscheinungen wurde so vorgegangen, daß ein beliebiger Klang, bestehend aus acht Teiltönen unterschiedlicher Lautstärke, eingestellt wurde. Das Einstellen der einzelnen Harmonischen geschah nacheinander, d. h. zu den schon vorhandenen wurde die jeweils nachfolgende noch dazugemischt. Auf diese Weise konnte vor Beginn des Versuchs kontrolliert werden, ob alle Harmonischen mit einer über der Hörschwelle liegenden Lautstärke vertreten waren.

Hier und auch bei anderen Versuchen konnte bemerkt werden, daß das Ohr, sofern es das Auftauchen der einzelnen Töne während des Einstellens gehört hatte, und so auf jeden einzelnen Teilton besonders aufmerksam gemacht worden war, auch noch nach Beendigung der Einstellung aller acht Teiltöne jeden einzelnen heraushören

[18]) C. STUMPF, a. a. O. S. 239.

konnte. Es gelingt dem Ohr, sozusagen jeden Ton einzeln auszublenden und für sich allein zu beobachten. Wurde daraufhin der Lautsprecher auf eine Zeit abgeschaltet, die länger sein mußte

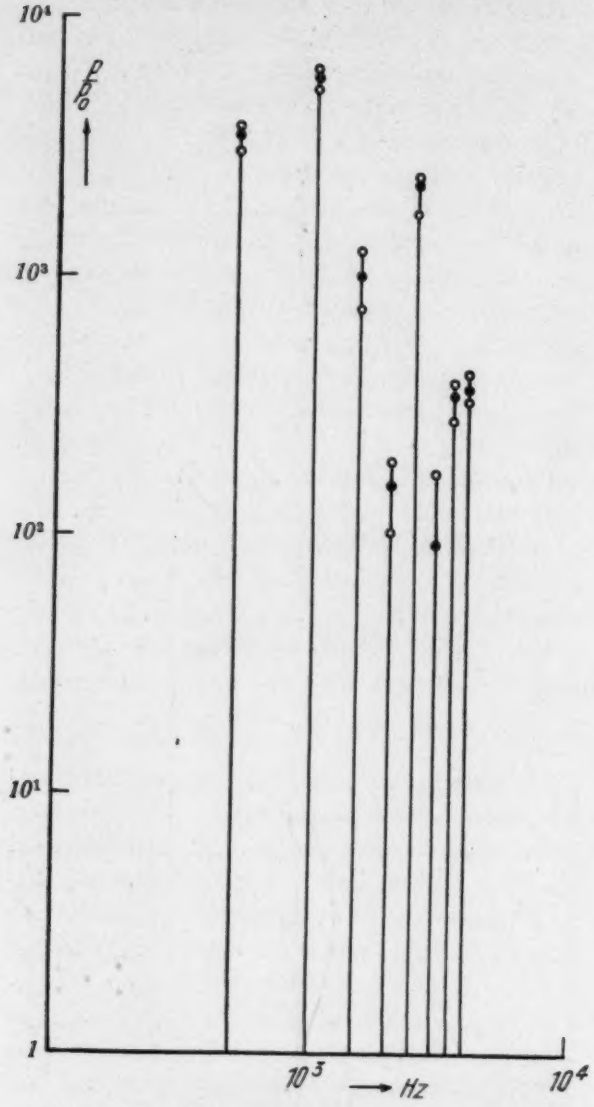


Abb. 14. Klangfarbenänderung hervorgerufen durch Amplitudenänderung eines Teiltones

Aufgetragen ist auf der Amplitude ● deren Änderung ○—●, die nötig ist, um eine gerade eben merkbare Klangfarbenänderung hervorzurufen. Frequenz des Grundtones = 512 Hz

als das Erinnerungsvermögen des Ohres, nämlich 10 . . . 20 sec, so hatte man nach Wiedereinschalten den Eindruck, einen geschlossenen Klang zu hören und nicht mehr acht einzelne Töne. Der Eindruck des Klanges kann noch verstärkt werden, wenn während der Pause die absolute Tonhöhe etwas geändert wird.

Die Änderung der Klangfarbe, die zu beobachten die folgende Aufgabe war, wurde dadurch

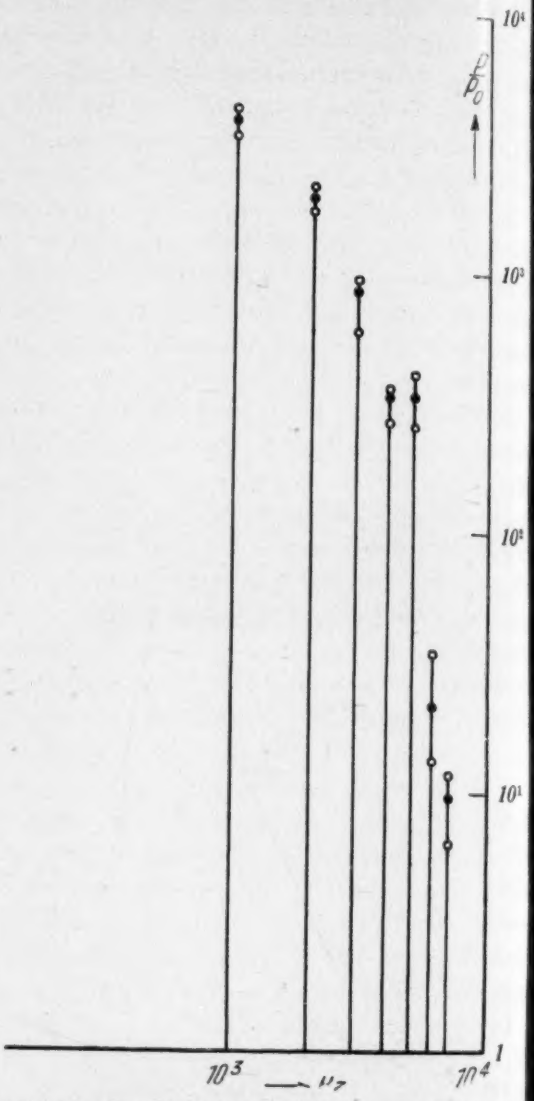


Abb. 15. Klangfarbenänderung hervorgerufen durch Amplitudenänderung eines Teiltones

Frequenz des Grundtones = 1024 Hz (siehe Bemerkungen zu Abb. 14)

erzielt, daß bei eingeschaltetem Lautsprecher die Lautstärke jeweils einer der Harmonischen so lange kontinuierlich vergrößert bzw. verkleinert wurde, bis eine Änderung der Klangfarbe wahrnehmbar wurde. Ein Versuch hatte ergeben, daß die schrittweise Änderung der Klangfarbe, wobei zwischen den einzelnen

Schritten der Lautsprecher abgeschaltet wurde, ein anderes Ergebnis liefert, sofern die einzelnen Schritte (hin und zurück) nur genügend schnell aufeinanderfolgen.

Bei der Vergrößerung der Lautstärke wurde beobachtet, daß durch die damit verbundene Betonung des betreffenden Teiltones sich dieser sehr bald aus dem ganzen Klang heraushebt, was einer Änderung der Klangfarbe gleichgesetzt wurde.

Bei der Verminderung der Lautstärke tritt bei weitem kein solch starkes Hervorheben des betreffenden Teiltones ein, weshalb auch in fast allen Fällen eine größere Änderung der Amplitude notwendig war, um die Klangfarbe eben merkbar zu ändern.

Es steht zu erwarten, daß für diese Untersuchungen das WEBER-FECHNERsche Gesetz gilt. Es sagt aus, daß gleichen absoluten Änderungen der Empfindung gleiche relative Änderungen des Reizes bezogen auf den Gesamtreiz entsprechen. Hier darf als Gesamtreiz nicht der gesamte Klang eingesetzt werden, denn für die Klangfarbenänderung kommt nur der Reiz in Frage, der dem betreffenden Teilton angehört. In einer Formel ausgedrückt lautet das Gesetz:

$$\partial L = \frac{\partial E}{E} \cdot \text{const}\,.$$

Dabei ist ∂L die Änderung der Empfindung, ∂E die Änderung des Reizes und E der Reiz selbst. Das Gesetz stimmt allerdings nicht streng, sondern hängt noch vom Intensitätsniveau und von der Frequenz ab, wie auch Untersuchungen von KNUDSEN zeigen[19]).

Bei den vorliegenden Versuchen entspricht ∂L der Klangfarbenänderung, ∂E der Lautstärkenänderung der betreffenden Harmonischen und E der Lautstärke dieser Harmonischen.

Wie schon erwähnt, ist in fast allen Fällen bei der Vergrößerung der Lautstärke eines Teiltones $\partial E/E$ kleiner als bei der Verminderung seiner Lautstärke (Abb. 14 und 15). Außerdem ist bei kleiner Lautstärke $\partial E/E$ größer als bei großer Lautstärke, was darauf zurückzuführen sein dürfte, daß die leisen Teiltöne durch die lauten mehr oder weniger verdeckt werden. Bei KNUDSEN liegen die Werte für $\partial E/E$ zwischen 0,1 und 0,4, hier liegen sie zwischen 0,07 und 0,4.

Man kann also sagen, eine Vergrößerung der Amplitude (Lautstärke) eines Teiltones macht sich früher durch eine Änderung der Klangfarbe bemerkbar als eine Verkleinerung und zwar deshalb, weil der lauter gewordene Ton plötzlich auffällt, während er vielleicht vorher aus dem Klang gar nicht herausgehört worden war. Außerdem kann man sagen, die Vergrößerung oder Verkleinerung der Lautstärke eines lauten Teiltones hat eine größere Klangfarbenänderung zur Folge als diejenige eines leisen Teiltones, gleiche relative Änderung vorausgesetzt.

Zur akustisch einwandfreien Übertragung eines Klanges ist es also erforderlich, daß die Verhältnisse der Lautstärken unter den lauten Teiltönen erhalten bleiben, während bei den leisen Teiltönen kleine relative Änderungen der Lautstärke statthaft sind, was jedoch nicht so weit gehen darf, daß sie ganz fehlen.

Im folgenden sollen als Beispiel für die weitere Verwendungsmöglichkeit der Apparatur noch zwei Versuche beschrieben werden.

A. Verdeckung in Abhängigkeit von der Lautstärke des verdeckenden Tones

Es interessiert die Frage, wie sich der Verdeckungsgrad ändert in Abhängigkeit von der Lautstärke des verdeckenden Tones und in Abhängigkeit von der Frequenz des verdeckten Tones. Verdeckter und verdeckender Ton sollen dabei wieder in harmonischem Verhältnis zueinander stehen.

Gegeben seien nur zwei Töne und zwar der Grundton als verdeckender und die zweite Harmonische (also die Oktave) als verdeckter Ton. Die Lautstärke des Grundtones war zunächst nicht sehr groß ($P_1 = 545\ P_{10}$). Der Schalldruck der Oktave wurde von Null anbeginnend langsam vergrößert, und bei $P_2 = 18{,}5\ P_{20}$ wurde der Ton gerade hörbar. Aus Abb. 16 Kurve *a* ist zu ersehen, wie mit zunehmender Lautstärke des Grundtones auch der Verdeckungsgrad wächst. Dabei fällt auf, daß er erst langsam, dann aber schneller zunimmt.

[19]) VERN O. KNUDSEN, Physic. Rev. 21 (1923), S. 84.

Bei den Meßpunkten 1 und 2 konnte das Auftauchen der zweiten Harmonischen deutlich bemerkt werden, und schon bei geringer Lautstärke war sie sauber zu hören. Bei Punkt 3 und noch mehr bei Punkt 4 war das nicht mehr so. Hier trat zunächst eine Klangfarbenänderung ein, und zwar hatte man den Eindruck, als würde die zweite Harmonische erst geschwächt und dann wieder verstärkt, obwohl sie in Wirklichkeit immer nur gleichmäßig verstärkt wurde. Erst bei sehr großen Amplituden der zweiten Harmonischen konnte sie auch selbst herausgehört werden. So war hierzu bei Punkt 4 das 10^5fache des Schwellendruckes nötig, wobei allerdings erwähnt werden muß, daß der Übergang von der Klangfarbenänderung bis zum deutlichen Heraushören der zweiten Harmonischen sehr kontinuierlich war, so daß eine genaue Grenze nicht angegeben werden kann. Außer der Klangfarbenänderung war aber noch eine zweite Erscheinung zu beobachten. Man hatte nämlich, besonders bei geschlossenen Augen, den Eindruck, als würde die Schallquelle auf den Beobachter zukommen. Andere Beobachter bestätigten diese scheinbare Bewegung des Lautsprechers.

Bei der dritten Harmonischen als verdeckter Ton waren die oben geschilderten Erscheinungen, nämlich die Klangfarbenänderung und die scheinbare Bewegung der Schallquelle, sehr viel schwächer ausgebildet und bei der vierten als verdeckter Ton fast nicht mehr zu bemerken.

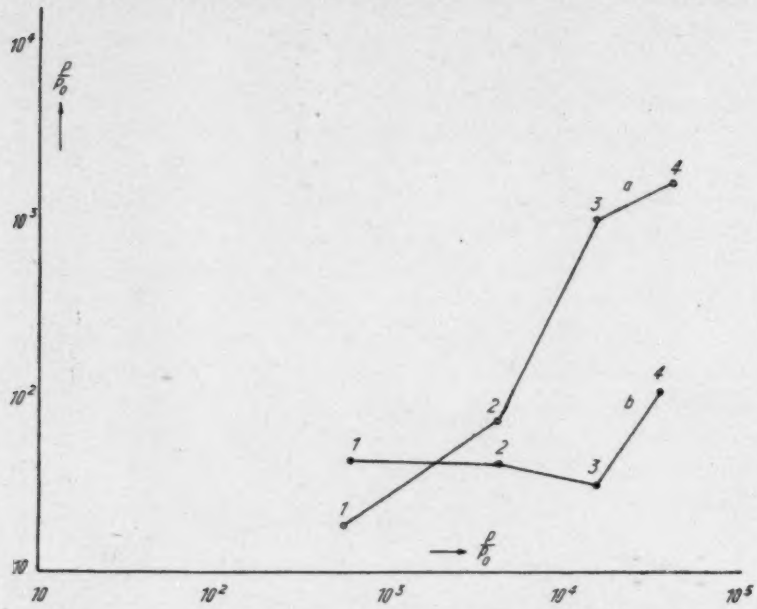


Abb. 16. Verdeckungsgrad in Abhängigkeit von der Lautstärke des verdeckenden Tones

a = Grundton und zweite Harmonische (512 Hz und 1024 Hz); b = Grundton und achte Harmonische (512 Hz und 4096 Hz). In der Abszisse ist aufgetragen P/P_0 des verdeckenden Tones. In der Ordinate ist aufgetragen P/P_0 des verdeckten Tones

Der gleiche Versuch wie mit der zweiten wurde auch mit der achten Harmonischen als verdeckter Ton wiederholt. Wie die Kurve b in Abb. 14 zeigt, bleibt hier der Verdeckungsgrad zunächst im wesentlichen konstant und nimmt erst bei sehr großen Lautstärken des Grundtones zu, aber lange nicht in dem Maße wie im Falle der zweiten Harmonischen. Es war hier keiner der oben beschriebenen Effekte zu beobachten. Die bemerkte eingetretene Änderung bestand immer nur darin, daß die achte gerade eben hörbar wurde.

Zu erwähnen ist noch, daß Verzerrungen des Verstärkers selbst, wie man vielleicht bei der Versuchsreihe mit der zweiten Harmonischen einwenden könnte, nicht in Frage kommen, da es sich um einen Gegentaktverstärker handelt, der allenfalls ungerade Harmonische liefert. Aber auch hier war der Klirrfaktor noch genügend klein.

Zweifellos steht die beobachtete Klangfarbenänderung mit der Nichtlinearität des Gehörorganes in Zusammenhang. Bei der sehr großen Lautstärke des Grundtones entsteht im Ohr selbst die zweite Harmonische mit beachtlicher Amplitude. Wird diese nun von außen dem Ohr nochmals zugeführt, so ist für die Gesamtwirkung die Phase zwischen dem subjektiven und dem objektiven Anteil der zweiten von Einfluß. Hat einer der beiden Teile der zweiten Harmonischen eine Komponente, die in Gegenphase zur anderen ist, so nimmt mit Vergrößerung der objektiven zweiten Harmo-

nischen im subjektiven Gesamtklang die zweite erst ab und dann wieder zu, was mit der Beobachtung übereinstimmt.

B. Klangsynthese

Im Rahmen der zur Verfügung stehenden acht Harmonischen eignet sich die hier verwendete Apparatur auch zur Klangsynthese. Wenn man die ungeraden Harmonischen mit genügender Amplitude einstellt und dazu noch die sechste und achte hinzufügt, so hat man den Eindruck eines Holzblasinstrumentes, der deutlich in den Klang einer Klarinette übergeht, wenn man die sechste und achte noch etwas weiter aufdreht. Hierbei kommt es auf ein genaues Innehalten der Amplituden der einzelnen Teiltöne gar nicht an.

Will man einen Klang nicht nur ungefähr, sondern genau nachbilden, so geht man am besten von der Analyse eines wirklichen Klanges aus. So wurde der Klang der leeren e-Saite einer nach BACKHAUS[20]) mechanisch angestrichenen Geige nachgebildet. In der Analyse waren nur die ersten acht Harmonischen enthalten, so daß für die Synthese mit der vorliegenden Apparatur keine Schwierigkeiten bestanden. Der Versuch gelang dann auch sehr gut. Ein Beobachter, dem nur gesagt wurde, es handle sich um eine Klangsynthese, gab auf Befragen richtig an, der Ton stamme von einer Geige und zwar sei es die e-Saite. Ein Vergleich mit der wirklich angestrichenen Geige ergab dann auch für das Ohr vollkommene Übereinstimmung, nur das bei Streichinstrumenten auftretende leise Kratzen des Bogens (Bogengeräusch) war in der Synthese nicht vorhanden.

Der gleiche Versuch mit der leeren a-Saite fiel weniger gut aus, denn die Synthese bestand nur aus den acht ersten Teiltönen, während im wirklichen Klang zwölf Teiltöne enthalten waren.

Die Synthese eines Cellotones von 180 Hz ergab subjektiv wieder vollkommene Übereinstimmung mit dem Original. Nur bezüglich des Bogengeräusches galt dieselbe Einschränkung wie oben.

Versuche zur Vokalsynthese scheiterten an der ungenügenden Zahl der zur Verfügung stehenden Teiltöne. Nur mit Mühe konnte der eingestellte Vokal erkannt werden. Am besten gelang noch die Nachbildung von „A". Der Synthese wurden Analysen von FERD. TRENDELENBURG[21]) zugrunde gelegt.

Zusammenfassung

Es wird ein Generator für harmonische Tonfrequenzen beschrieben. Er arbeitet nach dem Prinzip des Schwebungssummers, der jedoch für die vorliegende Aufgabe weitgehend erweitert worden ist. Mit dieser Apparatur werden Verdeckungserscheinungen zwischen harmonischen Tonfrequenzen untersucht. Die hierbei geltenden Gesetzmäßigkeiten werden aufgezeigt. Weiter wird die Abhängigkeit der Klangfarbenänderung von der Änderung der Amplitude eines Teiltones untersucht. Als Beispiel für die weitere Verwendungsmöglichkeit der Apparatur wird die Abhängigkeit des Verdekkungsgrades von der Lautstärke des verdeckenden Tones untersucht, wobei verdeckender und verdeckter Ton wieder in harmonischem Verhältnis zueinander stehen. Die Wechselwirkung zwischen den infolge von Nichtlinearitäten im Ohr entstehenden subjektiven Harmonischen und den von außen zugeführten objektiven Harmonischen wird beobachtet. Einige Klangsynthesen, die sich mit der Apparatur durchführen lassen, werden beschrieben.

Die vorliegende Arbeit wurde ausgeführt am Lehrstuhl für theoretische Elektrotechnik und Schwachstromtechnik der Techn. Hochschule zu Karlsruhe. Dem Inhaber dieses Lehrstuhles, meinem hochverehrten Chef und Lehrer, Herrn Prof. Dr. phil. HERMANN BACKHAUS, bin ich zu großem Dank verpflichtet für die Anregung zu dieser Arbeit und für das stets fördernde Interesse.

Die finanziellen Mittel für den Aufbau der Apparatur wurden von der Arnoldstiftung zur Verfügung gestellt, wofür ich an dieser Stelle meinen Dank aussprechen möchte. Der Helmholtzgesellschaft danke ich für die freundliche Überlassung eines Oszillographen.

[20]) H. BACKHAUS, Akust. Z. 1 (1936), S. 179. Auch erschienen in Z. techn. Physik 17 (1936), S. 573.

[21]) FERD. TRENDELENBURG, Klänge und Geräusche. Berlin 1935. S. 82.

(Eingegangen am 12. April 1938.)

Der wahre Frequenzgang bei der Tonfilmaufnahme

Von W. Vox

(Mit 9 Textabbildungen)

Mitteilung aus dem Laboratorium der Klangfilm G. m. b. H.

1. Aufgabenstellung

Nachdem von KÜPFMÜLLER[1]) und später von JOACHIM[2]) der Spaltfrequenzgang für den Rechteckspalt angegeben war, hat FRIESER[3]) zuerst versucht, den wirklichen Spaltfrequenzgang einer Tonaufnahme anzugeben, wobei er vereinfachend annahm, daß die Spaltbildbreite unendlich klein sei und die Intensität in der Emulsionsschicht nach einer exponentiellen Funktion abfällt.

Die vorliegende Arbeit ist der Auffindung des wahren Frequenzganges gewidmet. Als wahrer Frequenzgang wird die lineare Verzerrung der aufgezeichneten Amplitude als Funktion der Frequenz bezeichnet. Der Amplitudenabfall ist außer von der Spaltbreite von dem Einfluß der Optik und der Filmemulsion abhängig. Durch diese Einflüsse wird die rechteckige Lichtverteilung des mechanischen Spaltes verzerrt, so daß die wahre Spaltlichtverteilung sicher nicht mehr nach einer Rechteckkurve verläuft. Es muß daher zuerst gezeigt werden, daß und wie man für Spalte beliebiger Form und Transparenzverteilung die Frequenzgänge berechnen kann. Dann kann durch Versuche die bei der Tonaufnahme wirklich vorliegende Spaltlichtverteilung ermittelt und für diese Verteilung der Frequenzgang errechnet werden.

2. Theoretische Ableitung der Frequenzgänge von gleichseitigen und einseitigen Spalten

Wie bereits erwähnt, ist der Spaltfrequenzgang für den Rechteckspalt bekannt. Der Ausdruck für den Frequenzgangfaktor β lautet

$$\beta = k\frac{\Phi_w}{\Phi_{gl}} = k\frac{\sin\frac{\pi\cdot d}{\lambda}}{\frac{\pi\cdot d}{\lambda}}, \qquad (1)$$

worin k den Aussteuerungsfaktor, Φ_w die Wechsellichtamplitude und Φ_{gl} die Gleichlichtamplitude bedeutet. d ist die Spaltbreite und λ die Wellenlänge der Aufzeichnung. Die Wechsellichtamplitude verschwindet, wenn die Spaltbreite d gleich der Wellenlänge oder gleich einem ganzzahligen Vielfachen der Wellenlänge wird.

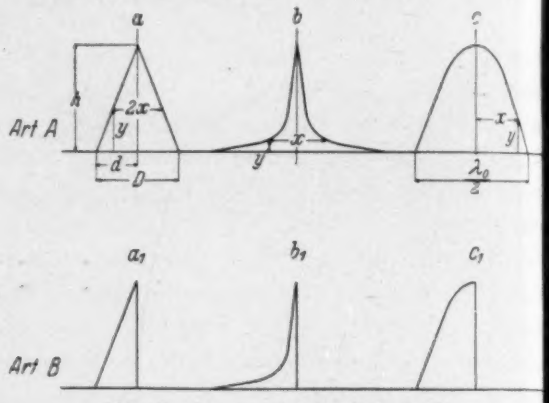


Abb. 1. Art A: gleichseitige Spalte
Art B: einseitige Spalte

Bevor Rechenmethoden für die Frequenzgangfaktoren beliebiger Spalte angegeben werden, ist eine Unterscheidung in solche der Art *A* der Abb. 1 und solche der Art *B* der Abb. 1 nötig. Spalte der Art *A* sollen gleichseitige Spalte heißen, weil die beiden Seiten in bezug auf die Mittellinie gleich sind, die Spalte der Art *B* werden dazu im Gegensatz als einseitige Spalte bezeichnet. Im weiteren Verlauf der Arbeit werden die Spalte a und a_1 Dreieckspalte, die Spalte b und b_1 Exponentialspalte und die Spalte c und c_1 Cosinusspalte genannt unab-

[1]) K. KÜPFMÜLLER, Z. techn. Physik 8 (1927), S. 474

[2]) H. JOACHIM, Z. techn. Physik 11 (1930), S. 168.

[3]) H. FRIESER, IX Congrès Internationale de Photographie. Paris 1935. Kongreßbericht 1936, S. 207.

hängig davon, ob sich die Form des Spaltes oder dessen Transparenzverteilung nach einer der angegebenen Funktionen verändert.

Die Spalte können — wie es in Abb. 2 für Dreieckspalte gezeigt ist — in eine Vielzahl von Rechteckspalte der Höhe $dy = \text{const}$ aufgeteilt werden. Wenn man annimmt, daß von jedem Spalt mit der Höhe dy eine Aufzeichnung erzeugt wird, so müssen die Einzelaufzeichnungen vektoriell addiert werden, um die Gesamtaufzeichnung zu ergeben. Bei gleichseitigen Spalten ist der Phasenwinkel φ zwischen den einzelnen Aufzeichnungen gleich Null, so daß die vektorielle in eine algebraische Addition übergeht. Es ist daher statthaft, um den Frequenzgangfaktor β zu erhalten, die Frequenzgangfaktoren $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ der Rechteckspalte mit der Höhe dy für sich nach der bekannten Formel (1) auszurechnen und zu addieren.

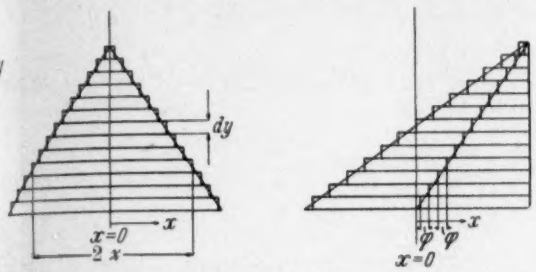


Abb. 2. Aufteilung der Spalte in Rechteck-Spalte

Für einen gleichseitigen Spalt ergibt sich somit:

$$\beta = k \cdot \frac{\sum \sin \frac{\pi}{\lambda} d_n}{\sum \frac{\pi}{\lambda} d_n}. \tag{2}$$

Da $dy = \text{const}$ angenommen wird, ist die Breite $d_n = f(y)$, und man erhält:

$$\beta = k \frac{\frac{\lambda}{\pi} \int \sin \frac{\pi}{\lambda} \cdot f(y)\, dy}{\int f(y)\, dy}. \tag{3}$$

Daraus resultiert für den gleichseitigen Exponentialspalt nach FRIESER [3]):

$$\underset{\substack{\text{(gleichseitiger}\\ \text{Exponentialspalt)}}}{\beta = k \cdot \frac{a^2}{a^2 + \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2}}, \tag{4}$$

wenn die Funktionen der einseitigen Exponentialspalte $y_1 = h \cdot e^{-ax}$ und $y_2 = h \cdot e^{ax}$ lauten.

Für einen gleichseitigen Dreieckspalt (Abb. 1) errechnet sich β wie folgt:

Es sei $\frac{d_n}{2} = x = \frac{d}{h}(h - y)$, wobei d die halbe Breite am Fuß des Dreieckes und h die Höhe des Dreieckes ist. Nach Einsetzen in Gleichung (3) erhält man:

$$\underset{\substack{\text{(gleichseitiger}\\ \text{Dreieckspalt)}}}{\beta = k} \frac{\frac{\lambda}{\pi} \int_0^h \sin \frac{\pi}{\lambda} 2\,(h-y)\, \frac{d}{h}\, dy}{2\,\frac{d}{h} \int_0^h (h-y)\, dy}. \tag{5}$$

Nach Auswertung der Integrale wird

$$\underset{\substack{\text{(gleichseitiger}\\ \text{Dreieckspalt)}}}{\beta = k \cdot \left(\frac{\lambda}{\pi}\right)^2 \cdot \frac{2}{D^2} \left(1 - \cos \frac{\pi}{\lambda} \cdot D\right)} = k \frac{\sin^2 \left(\frac{\pi \cdot d}{\lambda}\right)}{\left(\frac{\pi \cdot d}{\lambda}\right)^2}, \tag{6}$$

wobei $2\,d = D$ ist (siehe Abb. 1).

Für die Form des Cosinusspaltes kann (siehe Abb. 2c) angesetzt werden:

$$y = \cos \frac{2\pi}{\lambda_0} \cdot x,$$

dann ist

$$d_n = 2\,x = \frac{\lambda_0}{\pi} \cdot \text{arc cos}\, y.$$

Nach Gleichung (3) ergibt sich für den Frequenzgangfaktor:

$$\underset{\substack{\text{(Cosinusspalt,}\\ \text{gleichseitig)}}}{\beta = k} \frac{\frac{\lambda}{\pi} \int_0^1 \sin \frac{\lambda_0}{\lambda} \text{arc cos}\, y\, dy}{\frac{\lambda_0}{\pi} \int_0^1 \text{arc cos}\, y\, dy}. \tag{7}$$

Die beiden ausgewerteten Integrale ergeben durcheinander dividiert den Frequenzgangfaktor β:

$$\underset{\substack{\text{(Cosinusspalt,}\\ \text{gleichseitig)}}}{\beta = k} \frac{-\left(\frac{\lambda}{\lambda_0}\right)^2 \cos \frac{\lambda_0}{\lambda} \cdot \frac{\pi}{2}}{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_0}\right)^2} = k \frac{\cos \frac{\lambda_0}{\lambda} \cdot \frac{\pi}{2}}{1 - \left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^2}. \tag{8}$$

Bei den einseitigen Spalten muß — wie erwähnt — der Phasenwinkel φ berücksichtigt werden; die Addition der Einzelfrequenzgänge ist nicht mehr statthaft. An Hand der Abb. 3 wird gezeigt, wie man in einem solchen Fall vorgehen kann. Der Film F bewegt sich unter dem einseitigen Cosinusspalt in Richtung x, die Höhe des Spaltes sei h und die ausgenutzte Maximalbreite $\frac{\lambda_0}{4}$; die interessierende Frage

lautet dann: welche Lichtmenge befindet sich an der Stelle X, wenn der Film F mit konstanter Geschwindigkeit v an dem Spalt vorbeigezogen wird und die Intensität J über dem Spaltbild nach einer Sinusfunktion

$$J = J_0\left(1 + k \cdot \sin\frac{2\pi}{\lambda} x\right) \tag{9}$$

schwankt?

Diese Lichtmenge an der Stelle X ist gleich der Summe der Lichtmengen, die während des

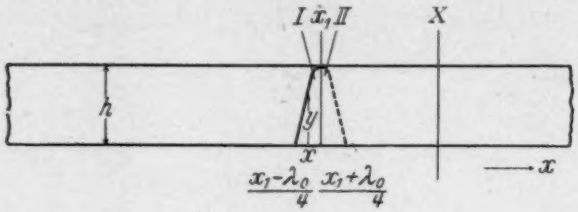


Abb. 3. Einseitiger Cosinusspalt

Vorbeiganges an dem Spalt auf die Stelle X auftreffen, und somit eine Funktion der Spaltform und der Sinusfunktion des schwankenden Lichtes.

Die Funktion der Spaltform ist:

$$y = h \cdot \cos\frac{2\pi}{\lambda_0}(x - x_1)\,. \tag{10}$$

Das nach dem Vorbeilaufen an dem Spalt an der Stelle X aufgespeicherte Licht ist:

$$\Phi_{ges} = \int_{x_1-\frac{\lambda_0}{4}}^{x_1} h \cdot \cos \cdot \frac{2\pi}{\lambda_0}(x - x_1) \cdot I \; J_0\left(1 + k \cdot \sin\frac{2\pi}{\lambda} x\right) dx\,. \tag{11}$$

Nun erinnern wir uns, daß der Frequenzgangfaktor definiert war als die Wechsellichtamplitude zur Gleichlichtamplitude. Gleichung (11) wird in den Gleichlicht und Wechsellichtanteil aufgespalten und der Quotient aus Wechsellicht- und Gleichlichtanteil gebildet, wie Gleichung (12) zeigt:

$$\underset{\text{(einseitiger Cosinusspalt)}}{\beta = \frac{\Phi_w}{\Phi_{gl}}} = k\,\frac{\sqrt{\left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^2 - 2\frac{\lambda_0}{\lambda}\cdot\sin\frac{\lambda_0}{\lambda}\cdot\frac{\pi}{2} + 1}}{1 - \left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^2}\,. \tag{12}$$

Integriert man Φ_w für den Cosinusspalt zwischen $x_1 - \frac{\lambda_0}{4}$ bis $x_1 + \frac{\lambda_0}{4}$, so ergibt sich der bereits auf andere Weise erhaltene Wert der Gleichung (8).

Für den einseitigen Exponentialspalt (siehe Abb. 1) hat CAUDA[4]) die Ableitung gebracht. Er erhält den Spaltfrequenzgangfaktor für den einseitigen Exponentialspalt nach (13):

$$\underset{\text{(Exponentialspalt einseitig)}}{\beta = \frac{\Phi_w}{\Phi_{gl}} = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_1} = k \cdot \frac{a}{\sqrt{a^2 + \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2}}}\,. \tag{13}$$

Zusammenfassend kann als Ergebnis der vorliegenden Rechnung Tabelle 1 aufgestellt werden. ε ist der Wechsellichtamplitudenfaktor und ε_1 der Gleichlichtfaktor.

3. Vergleich der verschiedenen Spaltfrequenzgänge

Die in der Tabelle 1 angegebenen Spaltfrequenzgänge sind in den Bildern 4 und 5 dargestellt. Bei Aufstellung der Frequenzgänge ist vorausgesetzt, daß die Formen der Spalte den

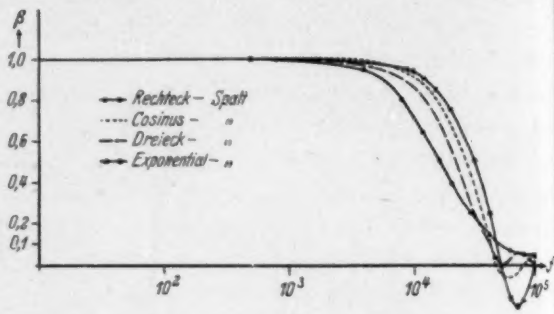


Abb. 4. Frequenzgang für gleichseitige Spalte

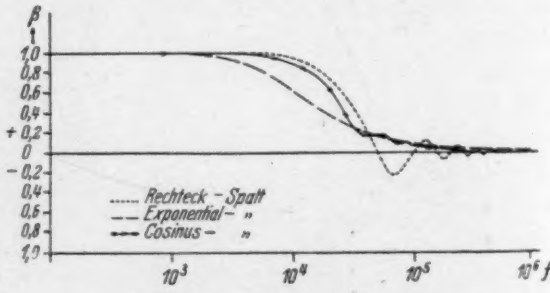


Abb. 5. Frequenzgang für einseitige Spalte

gleichen Flächeninhalt umfassen wie der Rechteckspalt von der Breite $d = 10\,\mu$. Als wesentlicher Unterschied zwischen den gleichseitigen und einseitigen Spalten wird erkannt, daß die Phase der aufgezeichneten Sinus-Schwingung bei den gleichseitigen Spalten von der Wellenlänge unabhängig ist, dagegen bei den einsei-

[4]) E. CAUDA, Kinotechn. 12 (1930), S. 445.

tigen Spalten mit der Wellenlänge sich verändert. Es ergab sich nämlich bei der Aufteilung der Gleichung (11) in den Gleichlicht- und den Wechsellichtanteil, daß die Phase der Aufzeichnung nicht konstant ist, sondern eine Funktion der Frequenz darstellt. Das heißt also, daß bei einseitigen Spalten außer der Amplitudenverzerrung auch noch eine Phasenverzerrung auftritt.

Bei den gleichseitigen Spalten (Bild 4) zeigt der Spaltfrequenzgang für den Rechteckspalt, daß bis zu verhältnismäßig hohen Frequenzen kaum ein Amplitudenabfall eintritt; beim Eintreten des Abfalls erfolgt dieser jedoch sehr schnell nach Null hin. Die erste Nullstelle liegt bei 50000 Hz, wenn der Spalt eine Breite von 10 μ hat und eine Geschwindigkeit von 50 cm/sec angenommen wird. Der Cosinusspalt-Frequenzgang hat einen ähnlichen Verlauf wie der Rechteckspalt-Frequenzgang. Der Dreieckspalt-Frequenzgang fällt noch eher als der Cosinusspalt-Frequenzgang ab; die Nullstelle ist dieselbe wie beim Rechteckspalt, aber die Phase schlägt nicht um, da für den Dreieckspalt die quadratische Funktion des Rechteckspaltes gilt. Verwendet man einen Exponentialspalt, so fängt die Amplitude an, bei 1000 Hz abzufallen. Dabei ist der Abfall aber sehr flach, und die Kurve erreicht erst im Unendlichen, d. h. bei sehr hohen Frequenzen, den Wert Null. Je nach den Bedingungen, die bei einer Aufnahme oder Wiedergabe gestellt werden, wird man die Spaltform wählen. Wird die Bedingung gestellt, für die aufgenommenen Frequenzen einen möglichst geringen, linearen Abfall zuzulassen, so wird man bis zu einer Frequenz von etwa 10000 Hz einen Rechteckspalt verwenden. Stellt man jedoch die Bedingung, möglichst hohe Frequenzen aufzunehmen, so muß der Spalt eine exponentielle Form annehmen; die lineare Verzerrung kann durch den Verstärker ausgeglichen werden.

Die einseitigen Spalte (Bild 5) haben Frequenzgänge, die erst bei sehr hohen Frequenzen nach Null gehen. Der einseitige Exponentialspalt zeigt bei hohen Frequenzen einen größeren β-Wert als der gleichseitige Exponentialspalt (Bild 4). Der einseitige Cosinusspalt hat eine ähnliche Eigenschaft. Beide Spalte sind mit Vorteil dort zu verwenden, wo noch sehr hohe Frequenzen aufgezeichnet werden sollen oder dort, wo die Geschwindigkeit des Transportträgers kleiner als bei Normalfilm ist

Tabelle 1

	Rechteckspalt	Dreieckspalt, gleichseitig	Cosinusspalt gleichseitig	Cosinusspalt einseitig	Exponentialspalt gleichseitig	Exponentialspalt einseitig
ε_1	d	$\frac{D}{2}=d$	$\frac{\lambda_0}{\pi}$	$\frac{\lambda_0}{2\pi}$	$\frac{2}{a}$	$\frac{1}{a}$
ε	$k\frac{\lambda}{\pi}\cdot\sin\frac{\pi\cdot d}{\lambda}$	$k\frac{\lambda^2}{\pi^2}\cdot\frac{1}{D}\left(1-\cos\frac{\pi}{\lambda}D\right)$	$k\frac{\lambda_0}{\pi}\frac{\cos\frac{\lambda_0}{\lambda}\cdot\frac{\pi}{2}}{1-\left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^2}$	$k\frac{\lambda_0}{2\pi}\frac{\sqrt{\left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^2-\frac{2\lambda_0}{\lambda}\sin\frac{\lambda_0}{\lambda}\cdot\frac{\pi}{2}+1}}{1-\left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^2}$	$k\frac{2a}{a^2+\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2}$	$k\frac{1}{\sqrt{a^2+\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2}}$
$\beta=\frac{\varepsilon}{\varepsilon_1}$	$k\frac{\sin\frac{\pi}{\lambda}\cdot d}{\frac{\pi}{\lambda}\cdot d}$	$k\frac{\lambda^2}{\pi^2}\cdot\frac{2}{D^2}\left(1-\cos\frac{\pi}{\lambda}D\right)$	$k\frac{\cos\frac{\lambda_0}{\lambda}\cdot\frac{\pi}{2}}{1-\left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^2}$	$k\frac{\sqrt{\left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^2-\frac{2\lambda_0}{\lambda}\cdot\sin\frac{\lambda_0}{\lambda}\cdot\frac{\pi}{2}+1}}{1-\left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^2}$	$k\frac{a^2}{a^2+\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2}$	$k\frac{a}{\sqrt{a^2+\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2}}$

(Schmalfilm). Zum Vergleich ist in Bild 5 noch der Rechteck-Frequenzgang (Breite 10 μ) aufgetragen.

Die vorhergehenden Überlegungen haben die Wege angegeben, für beliebige Spaltformen oder Lichtverteilungen die Frequenzgänge anzugeben, wenn Intensitätssteuerung des Lichtes vorausgesetzt wird.

4. Der wahre Frequenzgang bei der Tonaufnahme

a) *Einfluß des mechanischen Spaltes und des Filmes*

Der nächste Schritt muß die Auffindung der wirklichen Lichtverteilung bei der Tonaufnahme sein; diese ist zuerst bedingt durch den verwendeten Spalt, der als Teilfrequenzgang eingeht. Darüber hinaus bildet die Abbildungsoptik durch Beugung und Streuung, der Film durch Diffussion des Lichtes in der Emulsion und durch Erzeugung eines Reflexionslichthofes weitere Teilfrequenzgänge, die im Verlauf der Arbeit aufgefunden und zum Gesamtfrequenzgang zusammengefaßt werden.

Um Angaben über den Einfluß des Spaltes und des Filmes machen zu können, wurden mechanische Spalte von 10, 20 und 40 μ in einer besonderen Apparatur, die einer späteren Veröffentlichung vorbehalten ist, als Stillstandsbilder mit der Tonfilmbelichtungszeit von 1/50000 sec (Normalfilm) photographiert und die photographischen Spaltbilder in einem Mikrophotometer ausgemessen.

In Abb. 6 ist die Schwärzungsverteilung für einen Rechteckspalt von 20 μ Breite aufgetragen. Da die Schwärzungsverteilung symmetrisch zur Spaltmittellinie ist, wurde die Verteilung nur für eine Hälfte aufgetragen. Die in Abb. 6 dargestellte Kurvenschar bezieht sich auf Agfa Tf.-4-Material und Geyer-Titel-Entwickler von 3 min. Die Schwärzungsabfallkurven besitzen einen geraden Teil, für den angesetzt werden kann:

$$S = b \cdot x .$$

Aus der Schwärzungskurve $S = \gamma \cdot \log J$ ergibt sich der Intensitätsabfall, der durch die Diffusion des Lichtes in der Emulsion erzeugt wird:

$$J = e^{-\frac{b}{\gamma \cdot 0{,}43} x} .$$

Bei mittleren Schwärzungswerten ergab sich für die Kurzzeitbelichtung $b = 0{,}0625$. Da das Kurzzeitgamma im vorliegenden Fall $\gamma = 1{,}6$ ist, wird der Intensitätsabfall:

$$J = e^{-0{,}091 \cdot x} .$$

Wegen der Steilheit der Kurven ist der Wert b nur sehr schwer zu bestimmen, so daß auf eine einwandfreie Photometrierung geachtet werden muß.

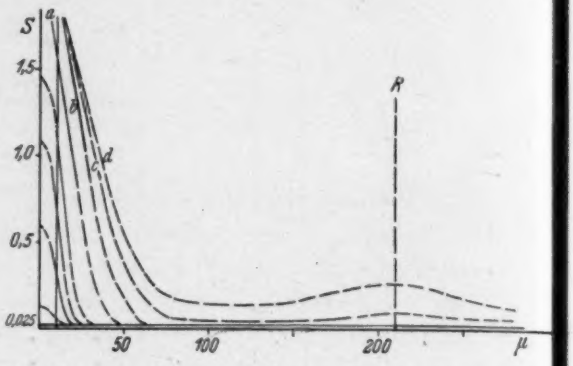


Abb. 6. Schwärzungsverteilung eines photographierten Rechteckspaltbildes (Breite 20 μ)

Die Abb. 6 zeigt, daß das Rechteckspaltbild durch den Diffusionslichthof stark deformiert wird. Dieses deformierte Spaltbild besteht in erster Annäherung aus einer mittleren, rechteckigen Zone und dem seitlichen Abfall. Die mittlere, rechteckige Zone ist nun je nach der Schwärzung schmaler, gleich breit oder breiter als das Rechteckspaltbild. Bei den Schwärzungen, wie sie bei der Intensitätsschrift vorkommen, ist die mittlere Zone immer schmaler als das eigentliche Rechteckspaltbild.

Außer dem Diffusionslichthof tritt — wie aus Abb. 6 ersichtlich — auch noch ein Reflexionslichthof auf. Der Reflexionslichthof kann als ein breiter Rechteckspalt aufgefaßt werden, auf welchem sich zu beiden Seiten des Hauptspaltes noch je ein schmaler Rechteckspalt befindet. Für Tf.-4-Material ist die Breite, wie aus den gemessenen Kurven ersichtlich, ca. 600 μ. Die kleinen, schmalen Spalte haben eine Breite von 50—70 μ, wenn mit einem 10-μ-Spalt

aufgenommen wird. Um die Intensität des Reflexionslichtes festzustellen, ist in Abb. 7 die Schwärzung des Hauptspaltbildes und die des reflektierten Spaltbildes als Funktion des log J aufgetragen. Der horizontale Abstand der Kurven gibt das Verhältnis $\Delta J = \log J_0 - \log J_k$ an. Das Licht des Hauptspaltes J_0 verhält sich zum Licht des reflektierten Spaltes J_k bei dem angeführten Beispiel wie 130:1. Bei kleineren Schwärzungen ist das Verhältnis kleiner. Im Mittel kann man mit einer Schwächung von

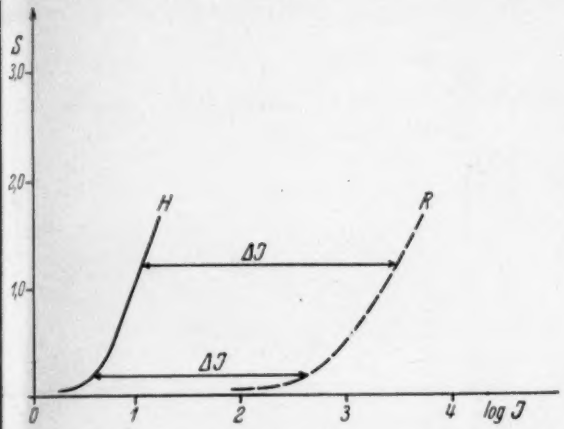


Abb. 7. H = Schwärzungskurve für das Hauptbild
R = Schwärzungskurve für das Reflexbild

100:1 rechnen. Es handelt sich nur noch um die Frage, wie groß die Intensität des breiten Spaltes ist, der vom Reflexionslichthof herrührt, im Verhältnis zu der Intensität J_R für den schmalen Reflexionsspalt. Aus den aufgeführten Kurven läßt sich das Verhältnis leicht berechnen, da auch die γ-Werte für die Kurven Abb. 6 bekannt sind. Für Tf. 4 ist dieses Verhältnis $\frac{J_R}{J_r}$ etwa $\frac{10}{6}$ bis $\frac{10}{8}$. Die Intensität J_r gilt für den breiten Reflexionsspalt.

b) Einfluß der Optik

Die Optik kann eine Verbreiterung des Spaltbildes durch Beugung hervorrufen. Von PICHT [5]) und PHILIPPOW [5]) sind Untersuchungen angestellt, die zeigen, daß bei den verwendeten Aufnahmeoptiken (Leitz Nr. 3 num. Apertur = 0,25) die Beugung ohne weiteres vernachlässigt werden kann.

Eine weitere Verbreiterung tritt durch das Streulicht auf. Das modulierte Streulicht in einer Aufnahmeapparatur rührt im wesentlichen von der Vorderlinse des Objektivs her. Das Licht, welches durch das Objektiv auf den Film fällt, wird zum Teil von der Filmoberfläche reflektiert, gelangt wieder auf das Objektiv und wird von dort wieder auf den Film geworfen. Um das Streulicht zu messen, wurde hinter dem Film eine Photozelle eingesetzt, die mit dem Multiflex-Galvanometer von Dr. LANGE verbunden war. Bei vollem Licht und herausgenommenem Film wurde der Nebenschlußwiderstand so eingestellt, daß das Instrument 100% Transparenz anzeigte. Unter Beibehaltung des gewählten Nebenwiderstandes wurde an der Stelle, wo das Spaltbild auf dem Film abgebildet wird, ein undurchsichtiges, mattes Kupferplättchen von der Größe $2200\,\mu \cdot 50\,\mu$ angebracht, so daß auf die Photozelle nur noch Streulicht fallen konnte. Vor der Photozelle war nun noch eine Irisblende angebracht, deren Öffnung verstellt werden konnte. Die Verstellmöglichkeit der Öffnung war nötig, um die Größe der Fläche, auf die das Streulicht fällt, bestimmen zu können. Nachdem nun das Kupferplättchen an die Stelle des Spaltbildes gebracht war, zeigte das Multiflex-Galvanometer eine Transparenz von 0,099; wurde die Öffnung der Irisblende verkleinert, so blieb die Transparenz zuerst konstant und fiel dann ab. War der Punkt erreicht, an dem die Transparenz anfing abzufallen, so war die Fläche der Irisblende gleich der Fläche des Filmes, auf die Streulicht fiel. Der Durchmesser der Fläche in vorliegendem Falle betrug 6,1 mm. Wenn angenommen wird, daß das matte Kupferplättchen ähnlich wie die Filmoberfläche reflektiert, und daß das reflektierte Licht ungefähr konstante Größe in diesem Gebiet hat, kann das Streulicht so aufgefaßt werden, als ob mit einem Spalt von der Breite 6000 μ und einer Intensität von 0,1 J_0 zusätzlich zu der Aufzeichnung des Hauptspaltes eine zweite Aufzeichnung erfolgt. J_0 ist die Intensität des Hauptspaltes.

[5]) PICHT und PHILIPPOW, Z. Instrumentenkde. 54 (1934), S. 253.

c) Wahre Spaltlichtverteilung und resultierender wahrer Frequenzgang

In der Abb. 8 ist die wahre Lichtverteilung im Spalt aus den einzelnen Teillichtmengen Φ_{w_1} bis Φ_{w_7} zusammengesetzt. Die Breiten und Intensitäten der Teilspalte sind — wie oben beschrieben — gemessen. Der eigentliche Aufnahmespalt beträgt 10 μ und der seitliche Abfall geht nach der Funktion $J = J_0 \cdot e^{-ax}$, wobei $a = 0{,}1$ angenommen ist. Der gemessene Wert war $a = 0{,}091$; des leichteren Rechnens wegen wurde der Wert $a = 0{,}1$ gewählt. Jedes der Teillichter Φ_{w_1} bis Φ_{w_7} bedingt einen Teilfrequenzgang, der für sich berechnet werden kann. Die Teilfrequenzgänge müssen mit der richtigen Phase zusammengesetzt werden. Als Bezugspunkt dient die Mitte des Rechteckspaltes (Abb. 8). Φ_{w_1}, Φ_{w_4} und Φ_{w_5} werden addiert. Für Φ_{w_2} und Φ_{w_3} ist es günstig, die beiden Wechselkomponenten für sich zuerst vektoriell zu addieren, wobei als Bezugspunkt für die Phase die Mitte des Rechteckspaltes gewählt ist. Mit Φ_{w_6} und Φ_{w_7} wird ebenso vorgegangen.

Es ergibt sich so eine Gesamtwechselamplitude:

$$\Phi_{w\,ges} = J_0 \cdot k \left[\frac{2}{a^2 + \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2} \left(a \cdot \cos\frac{\pi d}{\lambda} - \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \sin\frac{\pi \cdot d}{\lambda} \right) + m_1 \cdot \frac{\lambda}{\pi} \cdot \sin\frac{\pi \cdot d_2}{\lambda} \cdot 2\cos\frac{2\pi}{\lambda} \cdot g + \frac{\lambda}{\pi} \left(\sin\frac{\pi \cdot d}{\lambda} + m_2 \cdot \sin\frac{\pi D}{\lambda} + m_3 \sin\frac{\pi \cdot d_1}{\lambda} \right) \right] \cdot \sin\frac{2\pi}{\lambda} x .$$

Das Gleichlicht ist:

$$\Phi_{gl\,ges} = J_0 \left[d + \frac{2}{a} + m_1 \cdot d_2 + m_2 D + m_3 \cdot d_1 \right] .$$

Daraus resultiert der Gesamtfrequenzgang:

$$\beta = \frac{\Phi_{w\,ges}}{\Phi_{gl\,ges}} = \frac{2}{a^2 + \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2} \cdot \frac{a \cdot \cos\frac{\pi \cdot d}{\lambda} - \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \sin\frac{\pi \cdot d}{\lambda}}{d + \frac{2}{a} + m_1 d_2 + m_2 D + m_3 d_1} + \frac{m_1 \frac{\lambda}{\pi} \sin\frac{\pi \cdot d_2}{\lambda} 2\cos\frac{2\pi}{\lambda} \cdot g}{d + \frac{2}{a} + m_1 d_2 + m_2 D + m_3 \cdot d_1} + \frac{\frac{\lambda}{\pi} \left(\sin\frac{\pi \cdot d}{\lambda} + m_2 \sin\frac{\pi D}{\lambda} + m_3 \cdot \sin\frac{\pi \cdot d_1}{\lambda} \right)}{d + \frac{2}{a} + m_1 d_2 + m_2 D + m_3 \cdot d_1}$$

m_1, m_2 und m_3 sind die Faktoren, die angeben, um wieviel die Intensität in dem zugeordneten Spalt kleiner ist als im Hauptspalt. Werden für die einzelnen Werte die gemessenen Größen

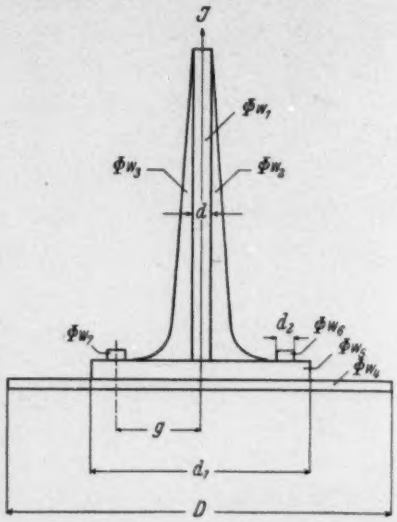


Abb. 8. Wahre Lichtverteilung im Spaltbild bei der Aufnahme

eingesetzt, so ergibt sich für Tf.-4-Film die in Abb. 9 dargestellte Frequenzkurve.

Durch diese Kurve können die bisher gemessenen und in der Tonfilmtechnik störend sich bemerkbar machenden Tiefenanhebungen einwandfrei erklärt werden. Die Anhebung, die zwischen 100 und 200 Hz erfolgt, ist eine Folge-

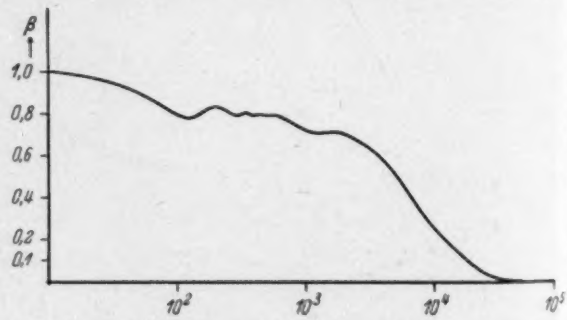


Abb. 9. Wahrer Spaltfrequenzgang bei der Aufnahme (Rechteckspalt = 20 μ)

erscheinung des Streulichtes der Optik. Abhilfe kann dadurch geschaffen werden, daß das Streulicht durch einen Schirm zwischen Objektiv und Film abgefangen wird.

Zwischen 2000 bis 1000 Hz tritt noch einmal ein Anstieg nach niedrigen Frequenzen auf.

Dieser Anstieg, der die Kurvenform nicht so stark beeinflußt wie das Streulicht, rührt vom Reflexionslichthof her, der durch die bekannten Reflexionsschutzschichten beseitigt werden kann. Allerdings wird durch den Reflexionslichthof die Frequenzgangkurve nur sehr wenig beeinflußt. Der schwach abfallende Auslauf der Frequenzkurve bei hohen Frequenzen rührt von dem Diffussionslichthof her, der dem Spalt einen exponentiellen Charakter verleiht. Da bei hohen Schwärzungen eine starke Verbreiterung des photographierten Spaltes eintritt, fällt die Frequenzkurve schon frühzeitig gegen Null ab, während sie bei der Aufzeichnung mit geringeren Intensitäten erst nach höheren Frequenzen abfällt.

Der nach dem beschriebenen Verfahren gefundene und in Abb. 9 aufgetragene Frequenzgang wird durch die bisher ausgemessenen Frequenzgänge[6]) bestätigt. Daß sich die einzelnen Effekte (Streulicht, Reflexionslichthof usw.) nicht so deutlich wie in Abb. 9 erkennen lassen, liegt darin begründet, daß die auf dem Film aufgezeichneten Frequenzen mittels eines Spaltes abgetastet werden müssen, so daß der Wiedergabe-Frequenzgang des Spaltes und das Streulicht der Wiedergabe-Optik mit in die Messung eingehen. Auch müßten bei einer genauen Angabe des Frequenzganges sehr viel mehr Einzelwerte gemessen werden, doch ist im ganzen gesehen eine gute Übereinstimmung mit dem berechneten Gesamtfrequenzgang vorhanden. Das angegebene Verfahren zur Feststellung des Frequenzganges hat den Vorteil, daß der wahre Spalt- und Film-Frequenzgang erhalten wird. Da in der heutigen Tonfilmtechnik das Bestreben besteht, daß die Aufnahme ihre Verzerrungen selbst kompensieren soll und die Wiedergabe nur für ihre eigenen Verzerrungen aufzukommen hat, ist es unbedingt wichtig, auch den wahren Spaltfrequenzgang bei der Aufnahme zu kennen.

[6]) A. Narath, Kinotechn. 16 (1934), S. 374.

Zusammenfassung

Der Spalt- und Filmfrequenzgang eines Tonfilms wurde bisher durch Abtastung mit einem Spalt wie bei der Wiedergabe von Tonfilmen photometriert oder elektrisch festgestellt. Nach dieser Methode kann der wahre Aufnahme-Spalt- und Filmfrequenzgang nicht festgestellt werden, da der Wiedergabefrequenzgang mit in die Messung eingeht. Die vorliegende Untersuchung ist der Feststellung des wahren Spalt- und Filmfrequenzganges bei der Aufnahme gewidmet. Dieser ist bedingt durch den Spalt, den Film und die Optik. Die Anteile der einzelnen Größen werden experimentell bestimmt und die wahre Lichtverteilung ermittelt. Diese führt rechnerisch zu dem wahren Frequenzgang. Die Berechnung des wahren Spaltfrequenzganges ergibt einen Abfall bei etwa 100 bis 200 Hz, der seine Ursache im Streulicht der Optik hat; bei 1000—2000 Hz tritt ein weiterer Abfall ein, der aber nicht so stark in Erscheinung tritt und vom Reflexionslichthof herrührt. Der Höhenabfall setzt sich aus dem Abfall für einen schmalen Rechteckspalt und zwei anschließenden Exponentialspalten zusammen, so daß im praktisch vorkommenden Bereich keine ausgesprochene Nullstelle auftritt, sondern die Kurve sich allmählich der x-Achse nähert.

(Eingegangen am 28. April 1938.)

Lautstärkenkarte eines Berliner Stadtbezirkes

Von H. Kösters, W. Bierreth und A. Kemper

Mitteilung aus der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt

(Mit 4 Textabbildungen)

Bereits im Jahre 1932 haben Bakos und Kagan[1]) die Lautstärke am Potsdamer Platz, in einer besonders stillen Villengegend in Westend und an einigen anderen Stellen gemessen. Im Hinblick auf eine systematische Bekämpfung des Verkehrslärms ist jedoch eine wesentlich genauere Kenntnis der Lautstärkenverteilung notwendig. Alle Fragen des Zusammenhanges zwischen der auftretenden Lautstärke, der Verkehrsdichte, der Straßenbreite, der Pflasterung, der Höhe der Häuser, des Baumbestandes, der Vorgärten u. a. m. sind für Städtebauer und Architekten wichtig und z. Z. noch ziemlich ungeklärt. Im Rahmen einer allgemeinen Untersuchung über den Verkehrslärm, die in der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt im Auftrage des Reichs- und Preuß. Verkehrsministers durchgeführt wird, haben wir deshalb eine Lautstärkenkarte von einem Berliner Stadtbezirk aufgenommen. Aus den Angaben dieser Karte kann nun der Verkehrsfachmann, der Architekt und vielleicht auch der Wohnungsuchende das herauslesen, was für ihn wichtig ist. Eine Auswertung nach diesen Gesichtspunkten soll von uns nicht durchgeführt werden.

Meßgerät

Da ein einfacher Geräuschmesser mit Anzeigeinstrument für die genauere Bildung von Mittelwerten bei einer so stark schwankenden Größe, wie der Lautstärke in einer Straße, nicht geeignet erschien, wurde die Messung mit einem schreibenden Geräuschmesser ausgeführt. Das Gerät bestand aus einem Pegelschnellschreiber[2]) in Verbindung mit einem dreistufigen Verstärker und einem Kondensatormikrophon. Der Schreiber besaß einen Aufzeichnungsbereich von 44—94 phon. Alle Lautstärkenangaben beziehen sich auf die Basis 0 phon = $2 \cdot 10^{-4}$ dyn/cm² (internationale Festsetzung, Paris 1937). Das Regelpotentiometer ändert bei wechselnder Lautstärke gleichzeitig die Frequenzbewertung entsprechend den bekannten Ohrkurven. Das Regelglied war ursprünglich für einen Bereich von 64 bis 114 phon gebaut, doch gelang es, durch den Frequenzgang des Mikrophons und des Vorverstärkers eine Frequenzbewertung der gesamten Anordnung zu erzielen, die bei 54 und 84 phon mit der vom Deutschen Akustischen Ausschuß vorgeschriebenen Frequenzbewertung übereinstimmt. Die Eichung des Gerätes erfolgte im freien Schallfeld. Für die laufende Nacheichung genügte eine elektrische Eichung des Verstärkers, da die Empfindlichkeit des Mikrophons gut konstant blieb.

Zur Beförderung dieser ziemlich umfangreichen Apparatur wurde der Laboratoriumswagen der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt benutzt, in den alle Geräte fest eingebaut wurden. Eine besondere Schwierigkeit bot die Aufstellung des Mikrophons. Es schien wünschenswert, das Mikrophon möglichst in Kopfhöhe und in größerem Abstand von dem hohen Kastenaufbau des Meßwagens aufzustellen. Hierzu wäre es notwendig gewesen, das Mikrophon an jeder Meßstelle aus dem Wagen herauszunehmen. Ein solches Verfahren erwies sich als undurchführbar, da das Mikrophon, sobald es auf der Straße stand, von einer gut schalldämmenden, manchmal aber auch schallerzeugenden Menschenmenge umgeben war. Es wurde deshalb eine kleine Störung des Schallfeldes durch den Wagenauf-

[1]) Z. VDI. 76 (1932), S. 145.

[2]) Elektr. Nachr.-Techn. Braunmühl und Weber 12 (1935), S. 223.

bau in Kauf genommen und das Mikrophon in 75 cm Höhe über dem Kühler des Wagens an einer Stange federnd aufgehängt. Das Mikrophon war über eine kapazitätsarme Leitung mit dem im Innern des Wagens befindlichen Vorverstärker verbunden. Der Betrieb des Vorverstärkers erfolgte aus Batterien, der des Pegelschreibers aus einem Umformer, der die Spannung der Autobatterie in 220 V Wechselspannung umwandelte.

Von großer Bedeutung für das Ergebnis einer solchen Messung sind die Auswahl der Meßplätze, die Dauer der Einzelmessung und die Tageszeit. Je engmaschiger man das Netz der Meßstellen macht und je größer die Zeit für die Einzelmessungen ist, um so zuverlässiger werden die erhaltenen Werte. Die Meßgenauigkeit ist somit nur eine Frage der insgesamt aufgewandten Zeit. Schwieriger ist die Beurteilung des Einflusses der Tageszeit, die an einzelnen Stellen von sehr großem, an anderen wieder von sehr geringem Einfluß ist. Die Genauigkeit der Lautstärkemessung bei diesen Verhältnissen anzugeben, ist schwer. Als Anhaltspunkt kann hier nur die Wiederholung einiger Messungen dienen, bei denen an einer Meßstelle niemals eine größere Abweichung als 5 phon gegenüber der ersten Messung gefunden wurde.

Die benutzten Auswahlregeln sind kurz folgende:

1. Die Messungen erfolgen nur an Wochentagen in der Zeit von 9^{30}—15^{30} Uhr und an Sonnabenden in der Zeit von 9^{30}—13^{30} Uhr. Damit ist der Einfluß des Zubringerverkehrs zu Beginn und Schluß der normalen Arbeitszeit ausgeschaltet.
2. Das Wetter soll möglichst windstill sein und es darf nicht regnen.
3. Der Abstand der Meßpunkte soll nach Möglichkeit 100—200 m betragen, unter Vermeidung zu kleiner Abstände von den Haltestellen der Omnibusse und Straßenbahnen.
4. Die Meßzeit beträgt an jedem Meßplatz 2 Minuten.

Ergebnisse

Nach diesen Regeln wurde ein rechteckiger Bezirk von 2,1 und 4,3 km Kantenlänge im Berliner Westen ausgemessen. Er ist so ausgewählt, daß er sowohl Verkehrsstraßen wie Wohnstraßen und Parkanlagen enthält. Die Zahl der Meßstellen in diesem Bezirk beträgt etwa 260.

Als Beispiel für eine derartige Messung sind in Abb. 1 und 2 zwei Registrierstreifen für Straßen

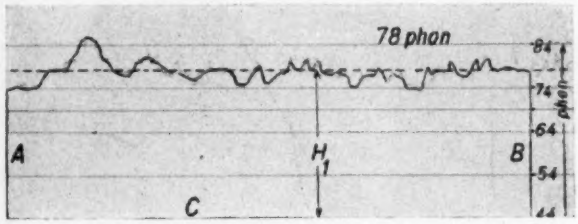


Abb. 1. Lautstärke in einer Straße mit dichter Fahrzeugfolge

Abb. 2. Lautstärke in einer Straße mit mittlerer Verkehrsdichte

mit großer und mittlerer Verkehrsdichte dargestellt. Die Geschwindigkeit des Papierablaufs betrug in allen Fällen 1 mm/sec, so daß man jedesmal einen 12 cm langen Streifen erhielt. Die Mittelwertbildung wurde mit einem Planimeter vorgenommen, in dem jeweils die von der Aufzeichnung des Pegelschreibers und den beiden Seiten A, B und C umschlossene Fläche ausgemessen wurde. Da 1 mm auf der Abszisse gleich einem Lautstärkenunterschied von 1 phon ist, ist die mittlere Höhe der Aufzeichnung H_1 in Millimetern gemessen, zuzüglich einer dem Anfangspunkt der Skala von 44 phon entsprechenden Höhe H_2 von 44 mm gleich der mittleren Lautstärke. Die mittlere Höhe H_1 erhält man durch Division der Fläche durch die Länge C des Meßstreifens.

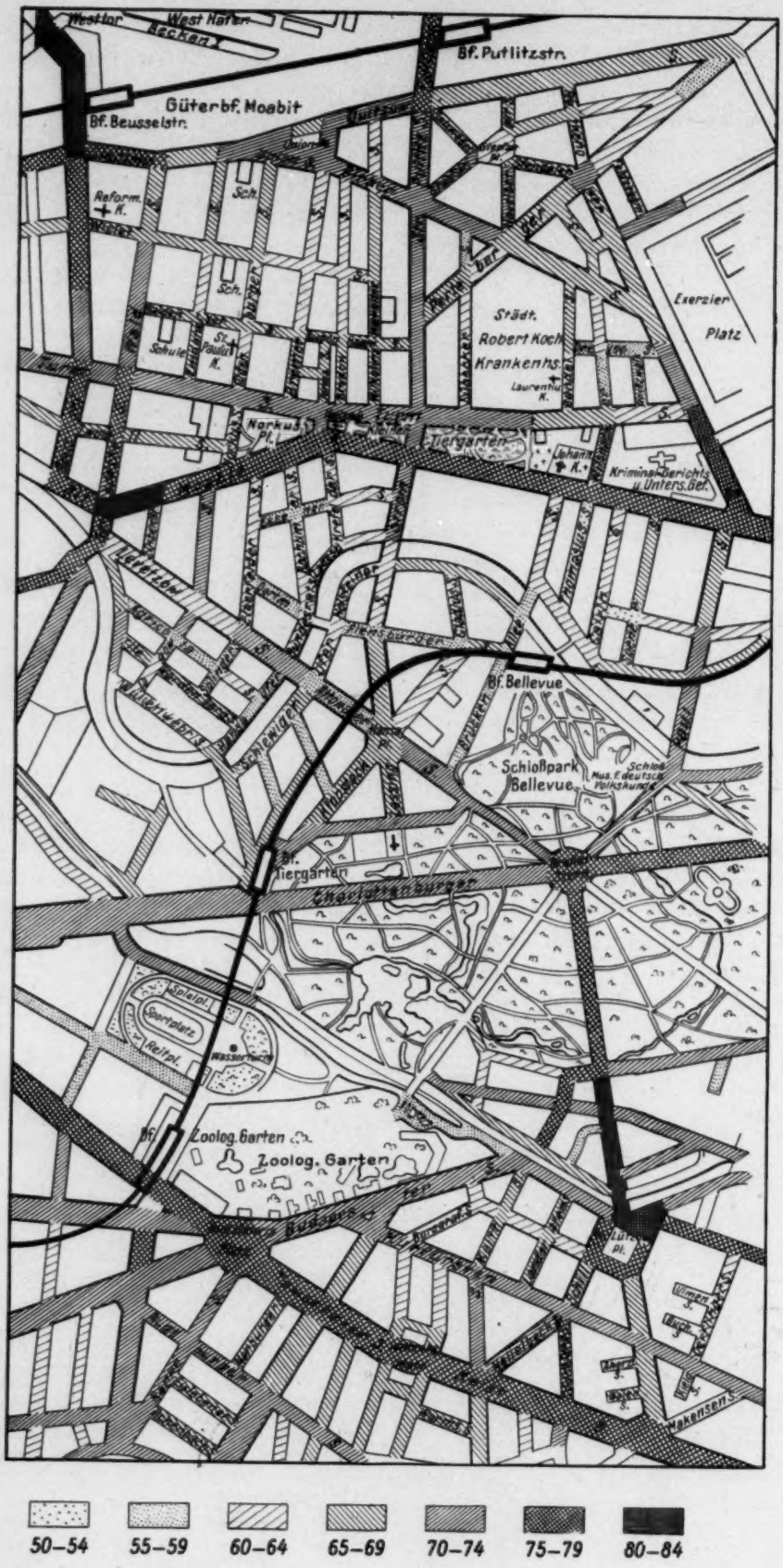


Abb. 3. Lautstärken-Karte eines Berliner Stadtbezirkes

Die an einer Meßstelle gemessene Lautstärke wurde, falls nicht besondere Umstände ausnahmsweise eine andere Einteilung richtig erscheinen ließen, einem Straßenstück zugeordnet, das von der Mitte zwischen zwei Meßstellen bis zur Mitte der nächsten beiden Meßstellen reicht. Bei der Kreuzung zweier verschieden lauter Straßen wurde stets der lauteren der Vorzug gegeben. Insgesamt sind in Abb. 3 7 Lautstärkestufen eingezeichnet.

Zur Ergänzung dieser Messung wurde noch eine Dauermessung über 24 Stunden an einer Stelle mit sehr starkem Verkehr (Kaiser-Wilhelm-Gedächtniskirche) durchgeführt, deren Ergebnis aus Abb. 4 zu ersehen ist. Hierbei wurde zu Beginn jeder Viertelstunde 5 Minuten lang gemessen, so daß immer 5 Minuten Meßzeit mit 10 Minuten Pause abwechseln. Die Darstellung läßt gut den Tagesablauf erkennen. Bemerkenswert sind die nur sehr kurze Verkehrsstille um 4 Uhr nachts und die beiden Spitzen beim Kinoschluß um 9^{15} und 11^{45} Uhr.

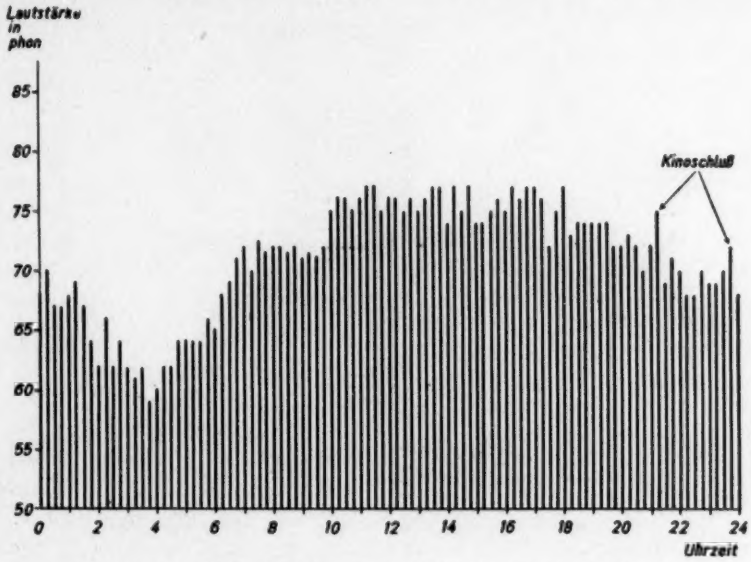


Abb. 4. Lautstärke an der Kaiser-Wilhelm Gedächtniskirche

(Eingegangen am 28. Mai 1938.)

PATENTSCHAU

Bearbeitet von Heinrich Kösters

79.

Deutsches Patent Nr. 661347, patentiert ab 7. 1. 1936, ausgegeben am 16. 6. 1938

Tobis-Tonbild-Syndikat in Berlin

Verfahren zur Herstellung einer Tonaufzeichnung in Sprossenschrift

Zur Erhöhung der Dynamik einer Sprossenschrift ist es bekannt, bis zu einem bestimmten Amplitudengrenzwert eine gleichbleibende Tonspurbreite zu benutzen und Amplituden, die diesen Wert übersteigen, mit veränderlicher Tonspurbreite aufzuzeichnen. Nach dem Patent soll nun eine weitere Vergrößerung der Dynamik noch dadurch erzielt werden, daß die unterhalb dieses Grenzwertes liegenden Amplituden mit veränderlicher Grundschwärzung aufgezeichnet werden.

80.

Deutsches Patent Nr. 661989, patentiert ab 12. 11. 1935, ausgegeben am 1. 7. 1938

Willy Meier-Pauselius in Hamburg

Stimme für Saiteninstrumente

Zur Verbesserung der Schallabstrahlung und zur Erzielung einer leichteren Ansprache bei Saiteninstrumenten benutzt der Erfinder einen neuartigen Stimmsteg als Kopplung zwischen Boden und Decke, wie in Abb. 1 dargestellt. Der Stimmsteg (*a*) geht hier nicht vom Boden (*y*) unmittelbar zur Decke (*x*), sondern trägt am oberen Ende einen Querbalken (*b*—*c*), der an den Stellen (*f*) und (*g*) an der Decke aufliegt. Wie sich ein derartiger Stimmsteg auswirkt, läßt sich bei den verwickelten Schwingungsvorgängen in einem Saiteninstrument schwer übersehen. Aus einem kleinem Werbeblatt des Erfinders

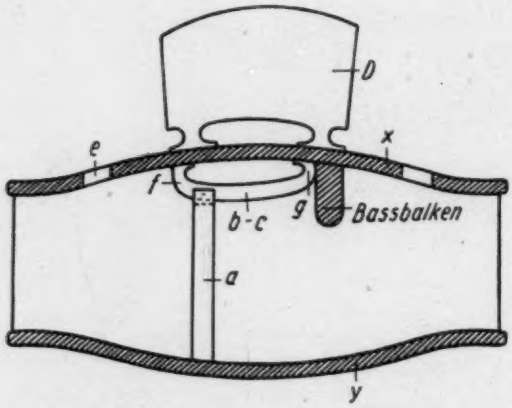


Abb. 1. Saiteninstrument mit neuartigem Stimmsteg

das mir zufällig in die Hände kam, geht jedenfalls hervor, daß in einer mündlichen Verhandlung des Patentamtes Instrumente mit der neuen Stimme vorgeführt wurden, und die Prüfer von der Wirksamkeit der Maßnahme überzeugt werden konnten.

81.

Nach der Fülle der Patente zu urteilen, scheinen die Möglichkeiten der Schallaufzeichnung auf Film noch lange nicht erschöpft zu sein. Patente, die neue Tonschriften behandeln, sollen deshalb von jetzt ab verhältnismäßig kurz beschrieben werden, da man schwer abschätzen kann, welche Aufzeichnungsarten einmal praktische Bedeutung erlangen werden.

Deutsches Patent Nr. 662706, patentiert ab 24. 6. 1936, ausgegeben am 20. 7. 1938

Verfahren zur Herstellung grundgeräuschfreier Tonfilme in Doppelzackenschrift

Deutsches Patent Nr. 662707, patentiert ab 24. 6. 1936, ausgegeben am 20. 7. 1938

Verfahren zur Aufzeichnung grundgeräuschfreier Zackentonschriftfilme

Deutsches Patent Nr. 662708, patentiert ab 25. 6. 1936, ausgegeben am 20. 7. 1938

Grundgeräuschfreier Doppelzackentonschriftfilm

Sämtlich Klangfilm-G. m. b. H. in Berlin, Dipl.-Ing. Wilhelm Vox

Das erste Patent schützt einen Tonfilm in Doppelzackenschrift, bei dem die beiden Zackenreihen mit verschiedener Amplitude aufgezeichnet werden. Hierbei kann auch die Mittellinie gekrümmt werden.

Das zweite Patent schützt einen grundgeräuschfreien Zackentonschriftfilm, bei dem ein Teil des Tonstreifens abgedeckt und gleichzeitig die Nullinie verlagert wird.

Das dritte Patent schützt eine Doppelzackentonschrift, bei der die Nullinie der einen Zackenfolge gerade, die Nullinie der anderen und somit auch die Mittellinie gekrümmt sind.

82.

Deutsches Patent Nr. 662367, patentiert ab 19. 7. 1936, ausgegeben am 11. 7. 1938

Firma J. Eberspächer in Eßlingen, Neckar

Schalldämpfer, insbesondere für Brennkraftmaschinen

Das Patent schützt eine Ausführungsform eines Schalldämpfers, der aus einer Reihe von Helm

OLTZschen Resonatoren besteht. Bei diesem in bb. 2 dargestellten Modell sind die einzelnen Kamern, deren Wände aus Metall sind, unter Zwischenhaltung eines Dämpfstoffes (*g*) in die äußere meallische Umhüllung (*h*) eingebettet. Der Einlaßutzen (*a*) und die Verbindungsrohre (*l*, *o*, *p*) sind erbei nur mit der rechten Kammer, in der ein ringerer Schalldruck herrscht, metallisch verinden. Hierdurch wird eine Körperschalleitung eitgehend vermieden.

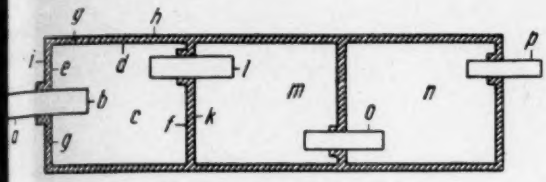


Abb. 2. Schalldämpfer

83.

eutsches Patent Nr. 662926 (Zusatzpatent), patentiert ab 19. 7. 1932, ausgegeben am 25. 6. 1938

elefunken-Gesellschaft für drahtlose Telegraphie m. b. H. in Berlin

Einrichtung zur Aufnahme oder Wiedergabe von Tonfilmen

Das Hauptpatent (Nr. 651176) schützte eine Einchtung, bei der der Film direkt über die zur Abldung benutzte Zylinderlinse gleitet. Nach dem usatzpatent wird diese Zylinderlinse als Rolle ausbildet, so daß die Gefahr einer Verletzung der chicht vermieden wird.

84.

eutsches Patent Nr. 663122, patentiert ab 19. 6. 1936, ausgegeben am 29. 7. 1938

adio-Corporation of America in New York, VStA.

Wiedergabe von Gegentakttonaufzeichnungen

Bei der Wiedergabe von Gegentakttonaufzeichngen können Intensitätsunterschiede der beiden albwellen durch verschiedene Empfindlichkeit der hotozellen entstehen. Diese Unterschiede sollen cht wie üblich auf elektrischem Wege, sondern urch Benutzung eines Graukeils oder durch Blenden hon im Lichtweg ausgeglichen werden.

85.

Deutsches Patent Nr. 663123, patentiert ab 25. 3. 1932, ausgegeben am 29. 7. 1938

Tobis-Tonbild-Syndikat AG. in Berlin, Hermann Birkhofer

Kontrolle von Lichttonaufzeichnungen

Der Verfasser geht von dem Gedanken aus, daß eine zuverlässige Aussteuerungskontrolle stets am letzten Glied einer Übertragungseinrichtung, also im Falle eines Tonfilmaufzeichnungsgerätes im Lichtstrom erfolgen muß. Hierzu soll folgende in Abb. 3 dargestellte Einrichtung dienen. Das von dem Lichtsteuerorgan (1) austretende Licht fällt auf die Filmrolle (2). Ein Teil des vom Film zurückgeworfenen Lichtes gelangt durch die Optik (3) auf die Photozelle (4). Der Photostrom wird über den Gleichstromverstärker (5) einem Kontrollhörer (7) und einem trägen Gleichstrominstrument (6) zugeleitet. Der Gleichstrom gestattet die Einstellung der Helligkeit des Lichtsteuerorgans, und eine Schwankung des Gleichstromes zeigt — ebenso wie die Schwankung des Anodengleichstromes bei einem Verstärkerrohr — eine Übersteuerung an.

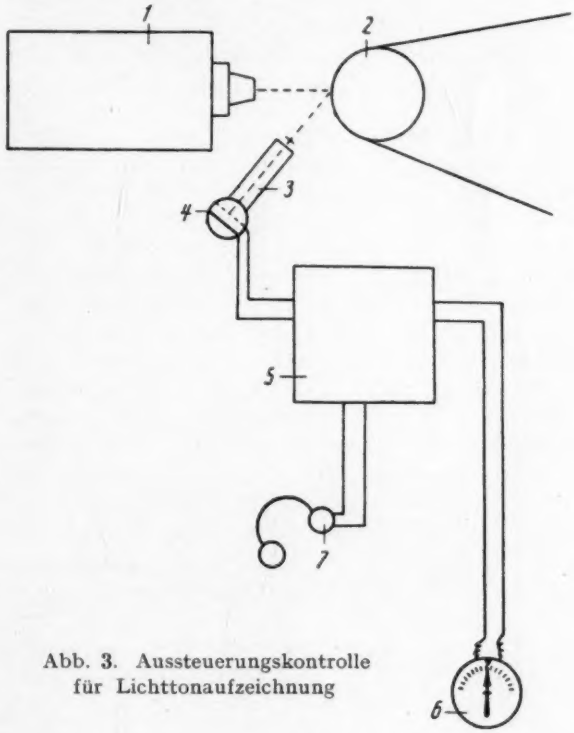


Abb. 3. Aussteuerungskontrolle für Lichttonaufzeichnung

SCHRIFTTUM

ARNOLD SCHOCH, **Die physikalischen und technischen Grundlagen der Schalldämmung im Bauwesen.** Mit 87 Abb. Verlag von S. Hirzel in Leipzig. 1937. Preis brosch. RM. 5,—, gebdn. RM. 6,20.

Das als erster Band der Buchreihe Physik und Technik der Gegenwart, Abteilung Akustik, erscheinende Buch vermittelt auch dem mit dem Stoff weniger Vertrauten einen umfassenden Überblick über den derzeitigen Stand der Schallschluck- und Dämmessung. Darüber hinaus befähigt es den Leser, selbst zu den praktisch vorkommenden Fragen Stellung zu nehmen. Dieses Ziel wird dadurch erreicht, daß einmal die Grundlagen der Akustik in einem einführenden Kapitel eingehend besprochen werden, zum andern, daß an Hand von Meßbeispielen, deren größte Zahl aus dem Untersuchungsmaterial des Instituts für Schwingungsforschung, Berlin, entnommen ist, auf das Grundsätzliche besonderer Wert gelegt wird. Einführend wird dargestellt, wie sich der Schall ausbreitet, was ein Ton, ein Klang, ein Geräusch ist, wie sich der Schalldruck und die Schallschnelle in der wandernden und der stehenden Welle verhält. Die Messung der Schallenergie bzw. des Schalldrucks und der Lautstärke wird unter Beifügung der Erschütterungsempfindlichkeit dargestellt. Nach diesen grundlegenden Abschnitten wird zunächst die Schallschluckmessung besprochen. Das Hallraumverfahren in Verbindung mit Heultonschallquellen wird dafür meist angewandt. Die Aufzeichnung des Nachhallvorgangs ermöglichen logarithmisch schreibende Geräte. Das Schallschluckvermögen dünner Platten beruht in der Hauptsache auf dem Mitschwingen, das von porösen Schallschluckern auf der Dämpfung der in diese eintretenden Schallwellen. Der Schallschluckgrad für tiefere Frequenzen kann durch Einschalten von mitschwingenden Lufträumen hinter den schallschluckenden Platten erhöht werden. Das Schluckvermögen poröser Stoffe ist bei höheren Frequenzen wirksamer. Maßnahmen zur Luftschalldämmung bei Durchtritt der Schallwellen durch große und kleine Wandöffnungen werden mitgeteilt. Bei kleinen Öffnungen in dicken Wänden z. B. entstehen Resonanzräume, bei deren Eigenfrequenzen besonders viel Schallenergie durchgelassen wird. Die Messung der Schalldämmung geschieht meist in zwei durch den Prüfstoff getrennten Hallräumen. Sie ist definiert durch das Verhältnis der gesamten auf die Wand auffallenden Schallleistung zu der durchgelassenen. Bei nicht porösen Einfachwänden, wie Ziegel- und Steinmauerwerk, beruht die schalldämmende Wirkung hauptsächlich auf der Reflexion der Schallwellen. Mit steigender Frequenz nimmt die Schalldämmung meist zu. Verschiedene Abbildungen zeigen, daß die Abhängigkeit von Wandgewicht und Schalldämmung etwa linear verläuft. Wegen der Schließung der Wandporen erhöht das Auftragen von Mörtel und Putz die Schalldämmung. Auf die Theorie des Schalldurchgangs durch nicht poröse Wände wird unter vereinfachenden Annahmen eingegangen. Tritt der Schall durch poröse Wände, so erfolgt seine Schwächung sowohl durch die Poren als auch durch Wandschwingungen. Es tritt eine Erhöhung der Dämmung mit wachsender Wanddicke besonders bei hohen Frequenzen auf. Zusammengesetzte Wände, die abwechselnd aus Wandung und Luftpolster bestehen, dämmen analog den elektrischen Tiefpässen, so daß ihre Theorie in ähnlicher Weise durchgeführt werden kann. Körperschall breitet sich in den verschiedensten Schwingungsarten aus. Die Dämmung ist bei allen verwandten Baustoffen verhältnismäßig gering. Gemessen wurde sie vor allem an Stäben. Um die Erschütterungen von Maschinen z. B. zu verringern, sind Zwischenschichten einzuschalten, an deren Grenzflächen die Welle reflektiert wird. Federnde Aufhängung ist besonders wirksam, wenn der zu dämmende Frequenzbereich hoch über der Eigenschwingung der Aufstellung liegt. An Körperschalldämmstoffen haben sich Stoffe mit kleiner Elastizität bewährt. Zur Messung des Körperschalls in Gebäuden sind Anordnungen angegeben worden, die den Trittschall durch Beklopfen der Decken in reproduzierbarer Weise nachahmen. Er wird als Luftschall von Decken und Wänden abgestrahlt und als solcher auch gemessen. Die subjektive Lautstärke nimmt in den einzelnen Stockwerken etwa linear mit der Entfernung ab. Auf die den Körperschall stark verringernde schwebende Bauweise wird hingewiesen.

Die äußerst klare Darstellung des gebotenen Stoffes wird dem Buch eine weite Verbreitung sichern. LOTTERMOSER.

Richtlinien für die Lärmabwehr in der Lüftungstechnik, hrsg. vom Verein Deutscher Ingenieure, Berlin NW 7, 14 S. mit 17 Abb. Format DIN A 4. Preis broschiert RM 1,50.

Die vorliegenden Richtlinien sind vom Fachausschuß für Lüftungstechnik des VDI (Obmann H. GRÖBER) unter besonderer Mitarbeit von E. LÜBCKE und W. ZELLER geschaffen worden.

Sie enthalten zunächst einen allgemeinen Teil, eine Einführung in die physikalischen und physiologischen Begriffe, die Geräuschmeßgeräte sowie einige Gesetze zur Lärmabwehr. Es werden dann die einzelnen Geräuschquellen behandelt (im Antrieb, im Lüfter, in der Pumpe, in der Luftleitung, bei Ein- und Auslässen usw.). Den Hauptteil der Schrift bilden naturgemäß die Maßnahmen zur Geräuschbekämpfung, die an den obengenannten Stellen ausgeführt

erden können, die wichtigsten davon sind an der Luftitung zu treffen, die mit Schallschluckstoffen poser oder schwingungsfähiger Art ausgekleidet wird. Die Zusammenstellung ist für alle Ingenieure, die it Lüftungsfragen zu tun haben, von großer praktscher Bedeutung. E. MEYER.

DI-Jahrbuch 1938. Die Chronik der Technik. VDI-Verlag G. m. b. H., Berlin 1938. 312 S., Format Din A 5, Preis brosch. RM. 5,50 (VDI-Mitglieder RM. 3,15).

Das VDI-Jahrbuch 1938, es ist das fünfte dieser eihe, stellt sich seinen Vorgängern ebenbürtig an e Seite. Über den Wert und die Zweckmäßigkeit ieser Bücher soll hier nicht gesprochen werden; es ist bereits beim Erscheinen des VDI-Jahrbuches 937 geschehen [s. Akust. Z. 2 (1937), S. 206]. Es oll vielmehr nur auf die den Leserkreis dieser Zeitchrift interessierenden Teile hingewiesen werden. Der bschnitt „Physikalische Akustik" (Bearbeiter: . RAMSAUER) behandelt die Untersuchungen an usikinstrumenten, die Verfahren zur Aufzeichnung on Melodiekurven, hörphysiologische Untersuchunen und die Anwendung des Ultraschalles zur Unterchung und Beeinflussung von Werkstoffen. Das apitel „Schwingungslehre" (W. HORT) ist eingeeilt in: Theoretische Grundlagen, Träger und Stäbe, embranen und Platten, Meßtechnik, Schwingungen n Maschinen- und Fahrzeugbau und im Bauwesen. ehr umfangreich ist das Schrifttum im Abschnitt Schalltechnik" (W. ZELLER). Inhalt: Allgemeines, au- und Raumakustik, Lärmabwehr in Betrieben nd bei Fahrzeugen.

Als Neuerung ist in diesem Jahre am Ende jedes bschnittes eine Zusammenstellung der neuesten ücher zu finden. GERHARD BUCHMANN

. u. W. TRENDELENBURG, **Über die Ermittlung der Verschlußzeit der Stimmritze aus Klangkurven von Vokalen.** S.-B. preuß. Akad. Wiss., Phys.-math. Kl. (1937), S. XX. Preis RM. 1.—.

Oktavsieboszillographische Aufnahmen von gengenen oder gesprochenen Vokalen, die für sich der in Konsonantverbindungen (Wörter oder Sätze) ervorgebracht werden, zeigen häufig in bestimmten öheren Siebbereichen in jeder Schwingungsperiode es Grundtones zwei Schwingungsgruppen. Es ird vermutet, daß es sich um Stoßerregungen hochrequenter Schwingungen im mittleren Kehlraum andelt, und daß die eine Schwingungsgruppe im ffnungsaugenblick, die andere beim Wiederverchluß der Stimmritze entsteht. Aus dem Abstand er beiden Schwingungsgruppen im Vergleich zur ange der Grundtonperiode kann man den Öffnungsuotienten der Stimmritze ermitteln. Ob der timmritzenverschluß sehr fest ist oder nicht, läßt ch daraus schließen, wie gut die beiden hochrequenten Schwingungsgruppen auf dem Oszillogramm getrennt erscheinen. E. THIENHAUS

W. TRENDELENBURG u. W. HARTMANN, **Der Ausdruck der Öffnung und Schließung der Stimmritze in der Periode des Luftklangs.** S.-B. preuß. Akad. Wiss., Phys.-math. Kl. (1937), S. XXVIII. Preis RM. —.50.

Bei Untersuchungen am Kehlkopfpräparat wird gleichzeitig mit dem Oktavsieboszillogramm der Luftschwingungen der Öffnungsvorgang der Stimmritze mittels Schattenschrift aufgezeichnet. Es bestätigt sich die Annahme von F. u. W. TRENDELENBURG (vgl. das vorige Referat), daß die in Siebkurven menschlicher Vokalklänge von ihnen nachgewiesenen beiden Schwingungsgruppen, deren größere gleichzeitig mit der „Anfangsgruppe" der Gesamtvokalkurve beginnt, durch die Unstetigkeit je im Moment der Öffnung und Schließung der Stimmritze erzeugt werden. E. THIENHAUS

G. W. PIERCE and ATHERTON NOYES, JR., **An Improved Magnetostriction Oscillator.** J. Acous. Soc. Am. 9 (1938), S. 185.

Der PIERCEsche Magnetostriktionssender ist in den letzten Jahren weiterentwickelt und verbessert worden. In seiner jetzigen Form stellt er für viele Zwecke, die eine große Zahl genau bekannter Frequenzen erfordern, ein wertvolles Gerät dar.

Der Oszillator besteht im wesentlichen aus einem 2-Röhren-Verstärker mit einer Kopplungsimpedanz Z_1 und mit einer Eingangs- und einer Ausgangsspule, in deren gemeinsamer Achse der Magnetostriktionsstab liegt. Die durch diesen Stab elektromechanisch gekoppelten Spulen müssen elektromagnetisch gut gegeneinander geschirmt sein. Zu den Geräten dieser Art gehören Sätze von Standard-Magnetostriktionsstäben. Für die Selbsterregung des Oszillators muß je nach Schaltung der Stabspulen Z_1 (Induktivität und Kapazität parallel) kapazitiven oder induktiven Blindwiderstand haben. Der erste Fall (kapazitiver Blindwiderstand) erweist sich als der günstigere. Die Wahl von Z_1 ist dann nicht kritisch; bei ungeänderter Kopplungsimpedanz werden z. B. in einem der Geräte Stäbe verschiedener Frequenz im Bereich 10—60 kHz in der Grundschwingung erregt.

Die Arbeit enthält zahlreiche Einzelheiten in bezug auf die Eigenschaften, den Bau und die Behandlung der Oszillatoren, beispielsweise die Vormagnetisierung der Stäbe, Einstellung der Stabspulen zur Erlangung von Oberschwingungen usw. und bringt Beschreibungen, Lichtbilder und Schaltskizzen von Geräten für spezielle Zwecke. Die Geräte zeichnen sich durch leichte Einstellbarkeit und gute Frequenzstabilität aus. Sie finden Verwendung als Ultraschallgeneratoren, zur Frequenzeichung elektrischer Apparate in allen möglichen Frequenzbereichen (evtl. Verwendung der Harmonischen zu den Grundschwingungen) usw. Ihre Einfachheit und Zuverlässigkeit empfiehlt sie für kommerzielle Verwendung. HERMANN OBERST

NACHRICHTEN

15. Große Deutsche Funkausstellung

Rundfunkgeräte

Die Hochfrequenztechnik und Elektroakustik sind heute in der Lage, Rundfunkgeräte und Übertragungsanlagen zu bauen, deren Wiedergabequalität kaum noch Wünsche offen läßt. Es ist daher im Augenblick weniger eine Aufgabe für den Konstrukteur, die Qualität noch zu verbessern als die, den für die Qualität notwendigen Aufwand einzuschränken, um zu einem niedrigen Preis für ein wirkliches Musikgerät zu kommen. Diese Entwicklung kann keine umwälzenden Neuerungen hervorbringen, sondern erfordert stetige Kleinarbeit, die schon in den letzten Jahren ein Merkmal der Funkausstellung war. Es sind im wesentlichen 3 Aufgaben — Vergrößerung der Dynamik, Erweiterung des Frequenzbandes und Verringerung des Klirrfaktors —, an deren Lösung zurzeit gearbeitet wird.

Die Vergrößerung der Dynamik nach oben begann vor zwei Jahren mit der Einführung größerer Endstufen und wird in diesem Jahre durch Verringerung der Rausch- und Brummspannung nach unten weiter fortgesetzt. Dies gelingt einerseits durch die Einführung einer neuen Vorröhre E F 13, die eine sehr kleine Rauschspannung besitzt und durch die Benutzung der E B F 11 als Regelröhre. Bei den bisher üblichen Regelröhren wird der Arbeitspunkt auf einer gekrümmten Kennlinie verschoben. Gelangt auf das Rohr gleichzeitig eine Störspannung, so kann an dieser Stelle die Hochfrequenz mit dieser Störspannung moduliert werden. Eine Trennung dieser unerwünschten Modulation von der gewünschten Modulation kann natürlich an keiner Stelle des Gerätes mehr erfolgen. Bei der neuen Regelröhre wird durch Änderung der Schirmgitterspannung das gesamte Kennlinienfeld geneigt, so daß der Verstärkungsgrad verringert wird, der Arbeitspunkt aber auf einem geraden Teil der Kennlinie verbleibt. Eine Modulation der Störspannung kann dann nicht mehr eintreten.

Der Betrieb von Wechselstromgeräten aus Gleichstromnetz unter Verwendung eines mechanischen Wechselrichters ist ebenfalls eine Maßnahme, die der Vergrößerung der Dynamik zugute kommt; denn nur so kann man die notwendige Anodenspannung zur Ausnutzung der vollen Leistung einer Endröhre aus dem Gleichstromnetz gewinnen.

Zur Verringerung des Klirrfaktors wäre es sicher am besten, an Stelle der Penthoden am Ausgang Trioden zu verwenden. Hierfür besteht jedoch folgende Schwierigkeit. Zum Betrieb eines Tonabnehmers zur Schallplattenwiedergabe genügt die Verstärkung von zwei Niederfrequenzstufen nur dann, wenn als letzte Röhre eine Penthode benut wird. Man steht also vor der Frage, drei Stuf Niederfrequenzverstärkung mit Triode oder zw Stufen mit Penthode zu verwenden. Aus preislich Gründen wird meistens der letztere Weg beschritte Um aber trotzdem den Klirrfaktor klein zu halte wird häufig eine Gegenkopplung benutzt, die zw den Verstärkungsgrad herabsetzt, aber das Ken linienfeld der Penthode doch erheblich linearisiert Damit dürfte in dem elektrischen Teil der Gerä genug zur Verminderung des Klirrfaktors getan sei Das Hauptaugenmerk wird sich in Zukunft der Ve besserung des Lautsprechers, als der vielleic schwierigsten Teilaufgabe aller Schallübertragung fragen, zuwenden. An einigen Stellen hilft man si durch Überdimensionierung des Lautsprechers. Z. wird an eine 5 Watt-Endstufe ein Lautsprecher a geschlossen, der normalerweise für den Anschluß a einen 10 Watt-Verstärker gedacht ist. Soweit si das bei den Vorführungen auf der Funkausstellu erkennen läßt, scheint dieser Weg erfolgversprechen

Die Erweiterung des Frequenzbandes, d einst mit der Frage Geradeausempfänger oder Supe het verknüpft war, ist heute davon unabhängig. Fa alle Geräte verfügen über eine gute Bandbreite regelung, so daß praktisch die jeweils ungestör Frequenzbandbreite auch ausgenutzt werden kan In einigen Fällen kann durch Ausschalten v Zwischenfrequenzfiltern vom Fernempfang auf Ort empfang umgeschaltet werden. Wie bei dem Klir faktor ist auch beim Frequenzband der Lautsprech heute entscheidend. Die sehr wünschenswerte Ve wendung mehrerer Lautsprecher, auf die das Fr quenzband verteilt wird, ist aus preislichen Gründe nur bei den Spitzengeräten möglich. Häufig wir das Lautsprecherfrequenzband durch elektrisch Entzerrung — Baßanhebung usw. — ausgeglichen

Übertragungsanlagen und Plattenschneidgeräte

Während für sehr hochwertige Übertragungen i Deutschen Rundfunk stets Kondensatormikrophon benutzt werden, sind auf der Ausstellung auch Kr stallmikrophone und dynamische Mikrophone z sehen. Verschiedene Ausführungen von Kristall mikrophonen werden von zwei Firmen (Grawo Berlin und Steg & Reuter, Homburg) gezeigt. Ma unterscheidet hierbei Membranmikrophone, b denen ein Biegersystem, wie es von den Tonabneh mern her bekannt ist, an eine Membran angekoppe ist und sog. Klangzellen, bei denen der Kristall direk

[1]) H. Bartels, Elektr. Nachr. Techn. 11 (1934) S. 319.

besprochen wird. Die Empfindlichkeit der Membrantypen ist im allgemeinen wesentlich höher und wird an einer Stelle, sogar mit dem erstaunlich hohen Wert von 50 mV/μb im Mittel angegeben. Die Frequenzkurve ist allerdings bei diesen Mikrophonen nicht so gut wie bei den einfachen Klangzellen. Dynamische Mikrophone werden von Philips und der AEG gezeigt. Nähere Angaben über Frequenzkurve und Empfindlichkeit konnten nicht erhalten werden.

Auf dem Gebiete des Lautsprecherbaues ist grundsätzlich Neues nicht ausgestellt worden. Telefunken verkleinert die Bautiefe des normalen dynamischen Lautsprechers dadurch, daß der Topfmagnet in den Konus hineinverlegt wird. Auf dem Stand der Deutschen Reichspost wird die Klangfilm-Euronor-Kombination gezeigt. Dieser Lautsprecher ist für Kinotheater und große Übertragungen entwickelt worden. Er besteht aus einem Tieftontrichter von 2 × 2 m Austrittsfläche und 3 Hochtonsystemen und hat ein sehr ausgeglichenes Frequenzband bis zu sehr tiefen Frequenzen.

Die Schallplattenaufzeichnungsgeräte, die bisher fast nur mit Kohlemikrophonen betrieben wurden, werden neuerdings auch mit Kondensatormikrophonen und anderen hochwertigen Mikrophonen ausgerüstet.

Verschiedenes

In einer Sonderschau der Deutschen Reichspost wird das Entstehen einer Sendung vom Sendesaal bis zur Antenne gezeigt. Dem Akustiker fällt hier auf, daß auf keinem Überwachungsgerät das Wort „Decibel" wohl aber die Bezeichnung „Neper" zu finden ist. In der Lehrschau „Physik und Technik im Rundfunk" wird die Vervollkommnung der Mikrophone und Lautsprecher an den verschiedensten Typen praktisch vorgeführt.

Heinrich Kösters

Vom 18.—22. Juli 1938 fand in Gent der III. **Internationale Kongreß für Phonetische Wissenschaften** statt. Die Tagung war ebenso wie die Zusammenkünfte, die 4 bzw. 8 Jahre vorher in Amsterdam und London abgehalten worden waren, von dem Ständigen Internationalen Phonetischen Ausschuß vorbereitet worden. Von deutscher Seite gehören diesem Ausschuß die Herren Prof. Dr. D. Westermann und Dr. E. Zwirner an.

Rund 300 Teilnehmer hatten sich angemeldet und besuchten auch eifrig die ungewöhnlich zahlreichen Vorträge. Sie werden in Kürze als Sonderveröffentlichung des III. Internationalen Phonetischen Kongresses erscheinen.

Die deutsche Abordnung unter Leitung des Herrn Prof. Westermann umfaßte 23 Herren und 1 Dame, meist Phonetiker und Sprachforscher im allgemeineren Sinne; doch war auch die Physik gut vertreten.

Wenn auch die Ausdrucksweise des Phonetikers dem Naturwissenschaftler nicht immer verständlich war, und oft auch ihre Problemstellung nicht recht eingesehen werden konnte, so war doch die Tagung vielleicht gerade aus diesem Grunde für die beiden verwandten Wissenschaftszweige von besonderem Wert. Freimütige Aussprachen sowohl im Anschluß an die Vorträge wie auch im kleinsten Kreise außerhalb der Tagung haben sicherlich dazu beigetragen, die bestehenden Mißverständnisse zu beseitigen.

Dipl.-Ing. **Friedrich Gladenbeck,** Ministerialrat im Reichspostministerium, ist zum Präsidenten der Forschungsanstalt der Deutschen Reichspost ernannt worden.

Auch auf akustischem Gebiet ist Präsident Gladenbeck durch mehrere Arbeiten hervorgetreten. So geht auf ihn in gemeinsamer Arbeit mit Ministerialrat Dipl.-Ing. Flanze eine Schaltung zurück, die eine wesentliche Verbesserung der Lautsprecherübertragung auf großen Plätzen erzielt. Auch hat er eine echofreie Lauthöreinrichtung angegeben, bei welcher ein elektrodynamisches System gleichzeitig als akustischer Sender und Empfänger Verwendung findet. Diese Schaltung wurde mit Erfolg bei der kürzlich eröffneten Fernsehübertragung München-Berlin in Betrieb genommen.

Dr. phil. habil. **Oskar Vierling,** Institut für Schwingungsforschung an der Technischen Hochschule Berlin, wurde zum 1. Oktober 1938 beauftragt, das Lehrgebiet Hochfrequenztechnik an der Technischen Hochschule Hannover zu vertreten.

Schallschutz im Wohnbau

Durch Erlaß des Reichsarbeitsministers vom 12. Juli 1938 ist das Din-Blatt 4110 als Richtlinie für die Baupolizei eingeführt worden. Es enthält technische Bestimmungen für Zulassung neuer Bauweisen und beschreibt in Abschnitt 11 die Forderungen für Schallschutz.

Diese Forderungen sind:

11. Schallschutz.

Der Schallschutz ist in einer Versuchsanstalt durch Versuche an Bauteilen in der vorgesehenen Ausführung festzustellen. Die etwa quadratischen Probestücke müssen bei Wänden mindestens 4 m², bei Decken 8 m² groß sein. Als Fugen- und Putzmörtel ist bei den Probestücken Kalkzementmörtel nach Din 1053 zu verwenden. Ist für die Bauweise jedoch Zementmörtel vorgesehen, so ist dieser zu verwenden. Probestücke aus Mauerwerk und verputzte Wand- oder Deckenstücke sind 2—3 Wochen nach der Herstellung zu prüfen.